



Algorithmes de suivi de cible mobile pour les réseaux de capteurs sans fils

Ibtissem Boulanouar

► To cite this version:

Ibtissem Boulanouar. Algorithmes de suivi de cible mobile pour les réseaux de capteurs sans fils. Informatique [cs]. Université Paris-Est, 2014. Français. <NNT : 2014PEST1077>. <tel-01124323>

HAL Id: tel-01124323

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01124323>

Submitted on 6 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ PARIS-EST

École Doctorale MSTIC

Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de
la Communication

THÈSE DE DOCTORAT

Discipline : Informatique

présentée par

Ibtissem BOULANOUAR

**Algorithmes de suivi de cible mobile pour les
réseaux de capteurs sans fil**

dirigée par M. Gilles Roussel

Soutenue le 24 juin 2014 devant le jury composé de :

M ^{me} Francine KRIEF	Université de Bordeaux	Rapporteur
M. Nadjib ACHIR	Université Paris 13	Rapporteur
M ^{me} Anne FLADENMULLER	Université Pierre et Marie Curie	Examineur
M. Thierry GAYRAUD	Université de Toulouse-UPS	Examineur
M. Yacine GHAMRI-DOUDANE	Université de la Rochelle	Examineur
M. Stéphane LOHIER	Université Paris-Est MLV	Co-encadrant
M. Abderrezak RACHEDI	Université Paris-Est MLV	Co-encadrant
M. Gilles ROUSSEL	Université Paris-Est MLV	Directeur

Institut d'Informatique Gaspard-
Monge (LIGM)
5, bd Descartes
77454 Marne La Vallée Cedex 02

Université Paris-Est
École Doctorale MSTIC
Mathématiques, Sciences et Tech-
nologies de l'information et de la
communication
5, bd Descartes
77454 Marne La Vallée Cedex 02

Remerciements

Au terme de ce travail, c'est avec émotion que je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.

En premier lieu, je tiens à remercier les membres du jury en commençant par Mme Francine Krief et M. Nadjib Achir qui ont bien voulu investir de leur temps précieux pour lire ma thèse. Leurs remarques m'ayant permis de finaliser le manuscrit de thèse. Je remercie aussi Mme Anne Fladenmuller, M. Thierry Gayraud et M. Yacine Ghamrioudane pour avoir accepté mon invitation et faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, M. Gilles Roussel et mes co-encadrants : M. Stéphane Lohier et M. Abderrezak Rachedi pour leur aide, leurs conseils et leur disponibilité ainsi que pour l'opportunité qu'ils m'ont offert.

Je voudrai remercier les membres du laboratoire Gaspard Monge, à commencer par sa directrice Madame Marie Pierre Béal pour son soutien indéfectible aux doctorants mais aussi Séverine, Corine et Patrice pour leur disponibilité et leur aide.

Mes remerciements s'adressent enfin à mes parents qui m'ont toujours soutenu et aux membres de l'équipe : Sylvain Camila et particulièrement Nadia pour son aide et sa patience.

Résumé

LES réseaux de capteurs sans fil se définissent comme un ensemble de petits appareils autonomes et interconnectés. Ces capteurs sont déployés dans une zone d'intérêt dans le but de collecter des informations de l'environnement comme la température ou la qualité de l'air, suivant l'application envisagée. L'évolution de ces dispositifs de capture vers le multimédia ouvre l'accès à une plus large palette d'applications et de services pour une meilleure maîtrise de notre environnement.

Dans cette thèse, nous nous intéressons au suivi de cibles mobiles dans les réseaux de capteurs sans fil, certains de ces capteurs pouvant collecter des images. Le suivi de cible (*Tracking*) consiste à détecter et à localiser sur l'ensemble de sa trajectoire une cible traversant une zone d'intérêt. Cette application peut s'avérer très utile, par exemple, pour détecter et enregistrer les déplacements d'un intrus dans une zone sensible ou encore pour suivre les déplacements d'une personne assistée et munie d'un appareil avec interface radio. Contrairement aux systèmes de surveillance classiques qui nécessitent une infrastructure fixe, les réseaux de capteurs sans fil sont aussi faciles à déployer qu'à désinstaller. De plus, grâce à leur polyvalence, ils peuvent être utilisés dans de nombreux environnements hostiles et inaccessibles pour l'être humain. Toutefois, étant restreints en énergie, ils ne peuvent rester actifs en permanence au risque de limiter considérablement leur durée de vie. Afin de résoudre ce problème, l'idée est d'activer uniquement les capteurs qui sont sur la trajectoire de la cible au moment où cette dernière est à leur portée radio ou visuelle. La question est donc : *comment et sur quels critères activer ces capteurs afin d'obtenir à tout moment le meilleur compromis entre la précision du suivi et la préservation des ressources énergétiques ?* C'est à cette question que nous essayerons de répondre tout au long de cette thèse.

Dans un premier temps nous nous intéressons aux cibles **communicantes** qui ont la faculté d'émettre des signaux et donc de faciliter grandement le processus de suivi. Le défi ici est de relayer l'information entre les différents capteurs concernés. Nous utilisons pour cela un algorithme de déploiement basé sur le concept de forces virtuelles (*VFA : Virtual Forces Algorithm*) associé à un algorithme de suivi collaboratif et distribué implémenté sur un réseau organisé en clusters. Ensuite, nous traitons le cas, plus complexe et plus fréquent, des cibles **non communicantes**. L'objectif est de détecter la présence de la cible uniquement à l'aide de capteurs de présence. Pour cela, nous proposons le déploiement d'un réseau de capteurs sans fil hétérogènes composé de capteurs de mouvement en charge de la partie détection de la cible et de capteurs vidéo en charge de la partie localisation. Lorsqu'une cible est détectée par un capteur de mouvement, l'information est communiquée aux capteurs vidéo voisins qui décident d'activer ou non leurs caméras en se basant sur des critères prédéfinis tenant compte

de l'angle d'orientation des caméras.

Enfin, dans une dernière contribution, nous nous intéressons plus spécifiquement aux modèles de mobilité de la cible. Ces modèles nous permettent d'anticiper ses déplacements et d'affiner le processus d'activation des capteurs qui sont sur sa trajectoire. Nous utilisons pour cela le filtre de Kalman étendu combiné à un mécanisme de détection de changements de direction nommé CuSum (*Cumulative Summury*). Ce mécanisme nous permet de calculer efficacement les futures coordonnées de la cible et de réveiller les capteurs en conséquence.

Mots-clefs

Réseaux de capteurs sans fil ; prédiction ; filtre de Kalman ; suivi de cible mobile.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSN) are a set of tiny autonomous and interconnected devices. These Sensors are scattered in a region of interest to collect information about the surrounding environment depending on the intended application. Nowadays, sensors allow handling more complex data such as multimedia flow. Thus, we observe the emergence of Wireless Multimedia Sensor Networks opening a wider range of applications.

In this work, we focus on tracking moving target in these kinds of networks. Target tracking is defined as a two-stage application: detection and localization of the target through its evolution inside an area of interest. This application can be very useful. For example, the presence of an intruder can be detected and its position inside a sensitive area reported, elderly or sick persons carrying sensors can be tracked anytime and so on. Unlike classical monitoring systems, WSN are more flexible and more easy to set up. Moreover, due to their versatility and autonomy they can be used in hostile regions, inaccessible for human. However, these kinds of networks have some limitations: wireless links are not reliable and data processing and transmission are greedy processes in term of energy. To overcome the energy constraint, only the sensors located in target pathway should be activated. Thus, the question is : *how to select these sensors to obtain the best compromise between the tracking precision and the energy consumption?* This is the question we are trying to answer in this dissertation.

Firstly, we focus on **communicating** targets which have the ability to transmit signals and greatly facilitate the tracking process. The challenge here is to relay the information between the concerned sensors. In order to deal with this challenge, we use a deployment strategy based on virtual forces (*VFA: Virtual Forces Algorithm*) associated to a distributed tracking algorithm implemented in a cluster-based network. Secondly, we handle a more complex and more frequent case of **non-communicating** targets. The objective is to detect the presence of such target using movement sensors. We propose the deployment of an heterogeneous wireless sensor networks composed of movement sensors used to detect the target and camera sensors used to locate it. When the target is detected, the information is sent to the camera sensors which decide whether to activate or not their cameras based on probabilistic criteria which include the camera orientation angle.

Finally, as our last contribution, we specifically focus on target mobility models. These models help us to predict target behaviour and refine the sensor activation process. We use the Extended Kalman filter as prediction model combined with a change detection mechanism named CuSum (*Cumulative Summury*). This mechanism allows to efficiently compute the future target coordinates, and to select which sensors to activate.

Keywords

Wireless Sensors Networks; prediction; Kalman filter; moving target tracking.

Table des matières

1	Introduction Générale	13
1.1	Contributions	14
1.1.1	Suivi de cible communicante	14
1.1.2	Suivi de cible non-communicante dans un environnement hétéro- gène	15
1.1.3	Suivi de cible non-communicante dans un environnement homogène	15
1.2	Organisation du document	16
2	État de l'art	17
2.1	Les réseaux de capteurs sans fil	17
2.1.1	Architecture physique d'un capteur sans fil	18
2.1.1.1	Unité de capture	18
2.1.1.2	Unité de traitement	19
2.1.1.3	Unité de communication	19
2.1.1.4	Batterie	19
2.1.2	Domaines d'application	19
2.1.2.1	Applications militaires	19
2.1.2.2	Applications environnementales	20
2.1.2.3	Applications médicales	20
2.1.2.4	Applications domotiques	20
2.1.2.5	Applications industrielles	20
2.1.3	Caractéristiques et Contraintes	20
2.1.3.1	Puissance de calcul	21
2.1.3.2	Communication	21
2.1.3.3	Énergie	21
2.1.4	Panel de capteurs existants	22
2.2	Vers les réseaux de capteurs multimédia sans fil	22
2.2.1	Caractéristiques et contraintes	22
2.2.1.1	Capture et traitement d'image	24
2.2.1.2	Besoin en mémoire	24
2.2.1.3	Transmission de données multimédia	24
2.2.2	Domaines d'application	24
2.2.2.1	Surveillance multimédia	24
2.2.2.2	Gestion et contrôle de trafic	25
2.3	Le suivi de cible mobile	25

2.3.1	Classification des algorithmes de suivi dans la littérature	26
2.3.1.1	Solutions basées sur une architecture hiérarchique	26
2.3.1.2	Solutions basées sur une architecture en cluster	27
2.3.1.3	Solutions prédictives	28
2.3.1.4	Solutions hybrides	28
2.3.2	Classification des algorithmes de suivi proposée	28
2.3.3	Métriques d'évaluation	29
2.3.3.1	Précision du suivi	29
2.3.3.2	Consommation énergétique	30
2.3.3.3	Nombre de message échangés	30
2.3.3.4	Délai de traitement	30
2.3.3.5	Taux de perte de la cible	30
2.3.3.6	Passage à l'échelle	30
2.4	Conclusion	31
3	Suivi de cible communicante	33
3.1	Motivations	34
3.2	Contexte et application	35
3.2.1	Stratégies de déploiement	35
3.2.2	Techniques de localisation	36
3.2.3	Algorithmes de suivi réactifs	37
3.3	Algorithme de suivi de cible communicante-CTC	39
3.3.1	Description du système	39
3.3.2	Déploiement du réseau basé sur W-VFA	39
3.3.3	Algorithme d'association	42
3.3.4	CTC	43
3.3.4.1	Détection	43
3.3.4.2	Sélection de capteurs	43
3.3.4.3	Localisation	46
3.3.4.4	Observation de la cible	46
3.4	Simulations et évaluation de performances	47
3.4.1	Contexte et paramètres de simulation	47
3.4.2	Stratégie de déploiement	51
3.4.3	Précision du suivi	51
3.4.4	Consommation énergétique	53
3.4.5	Nombre de messages échangés	54
3.5	Conclusion	54
4	Suivi de cible non-communicante dans un environnement hétérogène	55
4.1	Motivations	56
4.2	Contexte et applications	57
4.2.1	Algorithmes de suivi réactifs	57
4.3	Algorithme de suivi de cible non-communicante dans un environnement hétérogène-CTA	58
4.3.1	Description du système	58
4.3.2	Stratégie de déploiement	58

4.3.2.1	Déploiement initial	59
4.3.2.2	Orientation des caméras	60
4.3.2.2.1	Phase de collecte d'informations	60
	Liste des nœuds voisins	60
	Liste des sous-zones critiques	61
4.3.2.2.2	Phase de décision	61
4.3.3	CTA	62
4.3.3.1	CTA-déterministe	62
4.3.3.1.1	Détection	62
4.3.3.1.2	Localisation	63
4.3.3.2	CTA-probabiliste	64
4.3.3.2.1	Détection	64
4.4	Simulations et évaluation de performances	67
4.4.1	Évaluation de la stratégie de déploiement	67
4.4.2	Évaluation de CTA	68
4.4.2.1	Précision de suivi	69
4.4.2.2	Consommation énergétique	70
4.4.2.3	Nombre de messages échangés	72
4.4.3	Discussion	72
4.5	Conclusion	73
5	Suivi de cible non-communicante dans un environnement homogène	75
5.1	Motivation	76
5.2	Algorithme de suivi proactifs	78
5.3	Algorithme de suivi prédictif	79
5.3.1	Description du système	79
5.3.2	PTA : <i>Predictive Tracking Algorithm</i>	80
5.3.2.1	Réveil	80
5.3.2.2	Détection	80
5.3.2.3	Localisation	81
5.3.2.4	Prédiction	82
5.3.2.5	Sélection du capteur successeur	83
5.3.3	PMT ² : <i>Predictive Mobile Target Tracking</i>	83
5.3.3.1	Modèle de mobilité de la cible	84
5.3.3.2	Prédiction	85
5.3.3.2.1	Phase de prédiction	85
5.3.3.2.2	Phase de vérification	86
5.3.3.2.3	Phase de correction	86
5.4	Simulations et évaluation de performances	87
5.4.1	Évaluation de PTA	88
5.4.1.1	Précision du suivi	88
5.4.1.2	Déviations moyennes	89
5.4.1.3	Consommation énergétique	90
5.4.1.4	Nombre de messages échangés	91
5.4.2	Évaluation de PMT ²	91
5.4.2.1	Précision du suivi	91

Chapitre 1

Introduction Générale

IL suffit de regarder autour de nous pour remarquer que les objets de notre quotidien évoluent, nous offrant ainsi la possibilité d'interagir avec notre environnement. L'intégration des capteurs dans les objets de la vie quotidienne est en plein développement. Notre quotidien se transforme, s'enrichit d'applications jusque là inenvisageables.

Les réseaux de capteurs sans fil font partie de la révolution technologique des instruments de mesure, issues de la convergence des systèmes de communication sans fil et des systèmes électroniques miniaturisés. Il s'agit d'ensembles de dispositifs capables de capturer et de mesurer certains événements et phénomènes physiques voir d'interagir avec l'environnement où ils sont déployés. Ces réseaux se prêtent fort bien à de nombreuses applications dans des domaines tels que : les applications militaires, la surveillance environnementale, industrielle et médicale, entre autres. Les progrès récents ont permis le développement de capteurs de plus en plus performants pouvant maintenant gérer des données plus complexes comme les données multimédia. Cette évolution fait des capteurs sans fil l'un des composants principaux de *l'Internet des objets*. En effet, l'apport attendu de ces éléments permet d'envisager une autonomie et une interaction directe avec l'environnement offrant ainsi aux utilisateurs un ensemble d'actions/réactions de plus en plus complexes. Plus cette interaction est riche, plus les services rendus aux utilisateurs sont importants. Ce type de capteurs apportent cependant leur lot de contraintes dues principalement aux limitations matérielles ainsi qu'aux types d'informations traitées.

C'est dans ce contexte et motivé par les défis technologiques et matériels liés aux réseaux de capteurs sans fil que s'inscrit cette thèse. Nous nous intéressons aux applications de surveillance et en particulier au suivi de cible mobile. Cette application s'avère très utile, par exemple, pour détecter la présence d'un intrus et enregistrer ses déplacements dans une zone sensible ou encore pour l'assistance aux personnes munies d'un appareil avec interface radio.

Le suivi de cible mobile dans les réseaux de capteurs sans fil nécessite l'utilisation de mécanismes transverses. Alors que dans les systèmes de surveillance classiques le suivi de cible mobile se limite à deux étapes principales : détection et localisation de la cible, pour les réseaux de capteurs sans fil, l'implémentation d'étapes supplémentaires et automatisées peut s'avérer nécessaire. De plus, le traitement des données étant distribué, le relai et le partage des informations récoltées doivent être pris en compte.

Toutes ces contraintes font du suivi de cible dans les réseaux de capteurs sans fil une application complexe qui nécessite une étude approfondie. Actuellement, les travaux sur ce domaine se focalisent principalement sur la partie localisation ou *comment obtenir la position de la cible la plus précise possible*. Bien sûr la localisation est une étape très importante mais ce n'est pas la seule. Comme nous l'avons mentionné, le suivi de cible est une application qui nécessite l'utilisation de mécanismes transverses engendrant l'implémentation d'étapes supplémentaires. Une vision plus globale de l'application doit donc être envisagée. C'est ce que nous nous attelons à faire dans cette thèse.

Nous proposons des algorithmes de suivi de cible mobile en considérant d'une part le type de cible à suivre et d'autre part le type de capteurs composant le réseau déployé. Aussi sommes nous par ces contributions, capables de présenter des solutions efficaces pour le suivi de cible dans les réseaux de capteurs sans fil. Celles-ci permettant de gérer au mieux le compromis entre la précision du suivi et la consommation énergétique.

1.1 Contributions

Toutes les solutions proposées dans cette thèse traitent le suivi de cible mobile dans les réseaux de capteurs sans fil. Chaque solution se distingue par le contexte dans lequel elle est déployée.

1.1.1 Suivi de cible communicante

Dans cette première contribution ; nous nous sommes intéressés au suivi de cible **communicante**. Ce type de cible possède la faculté de communiquer avec le réseau et facilite grandement son suivi. Nous avons proposé CTC (*Cluster-based Tracking algorithm for Communicating target*), un algorithme de suivi distribué implémenté sur un réseau de capteurs organisé en clusters. Le choix de ce type d'architecture est motivé d'une part par son efficacité en terme de collaboration, traitement et partage de données et d'autre part par la facilité de passage à l'échelle. Le réseau déployé se compose de capteurs sans fil multimédia jouant le rôle de nœuds-fils et de capteurs sans fil non-multimédia à plus grande capacité énergétique assumant le rôle de nœuds-parents. Dans la mesure où la mobilité des capteurs n'est pas requise, nous optons pour une stratégie d'association statique.

Dans le cas d'une cible communicante le processus de suivi d'une cible démarre lorsque celle-ci manifeste sa présence en envoyant un signal radio. Une fois ce signal reçu par un nœud-fils, l'information est communiquée au nœud-parent qui se charge d'élire trois capteurs pour procéder à la localisation à l'aide d'un algorithme de trilatération. Le processus est ainsi itéré jusqu'à ce que la cible quitte la zone d'intérêt. L'élection est basée sur un modèle probabiliste intégrant deux paramètres fondamentaux : la précision du suivi et la consommation énergétique.

Les performances de l'algorithme de suivi étant étroitement liées au déploiement préalable des capteurs dans la zone d'intérêt, nous proposons également une stratégie de déploiement en liaison avec l'algorithme de suivi. Nous nous basons sur le concept de forces virtuelles (*VFA : Virtual Forces Algorithm*) proposé dans [94] et y introduisons le concept de sous-zones pondérées. En effet, nous considérons que dans les environnements réalistes, certaines sous-zones sont plus importantes à couvrir que d'autres.

Elles sont donc pondérées en fonction de cette importance et ce poids est pris en considération lors du déploiement des capteurs.

1.1.2 Suivi de cible non-communicante dans un environnement hétérogène

Dans cette deuxième contribution, nous nous sommes intéressés aux cibles **non-communicantes**. Une cible non-communicante est une cible non-coopérative, dénuée de la capacité de communiquer avec le réseau (exemple : humains, animaux, etc). Ces cibles sont donc plus réalistes et complexifient le processus de suivi. En effet, la question qui se pose est la suivante : *comment détecter la présence de la cible si celle-ci ne se manifeste pas ?*

Nous avons proposé le déploiement d'un réseau de capteurs hétérogènes composé de capteurs scalaires et de capteurs multimédia. Chaque type de capteur est en charge d'une tâche spécifique. Les capteurs scalaires intégrant des détecteurs de mouvement se chargent de détecter la présence de la cible dans la zone d'intérêt, les capteurs multimédia équipés de caméras se chargent quant à eux de la localiser. Les capteurs multimédia ne doivent être réveillés que si la cible se trouve à leur portée. C'est pourquoi une condition de réveil basée sur un modèle probabiliste qui intègre l'orientation de la caméra comme paramètre est implémentée. Ce mécanisme de réveil permet d'éviter l'activation inutile de capteurs et par conséquent la perte d'énergie.

Le réseau étant hétérogène et le processus de suivi basé principalement sur la collaboration entre les deux types de capteurs, la nécessité d'une stratégie de déploiement s'impose. L'objectif étant différent de la première contribution, nous proposons donc une stratégie plus adaptée à ce contexte. En effet, alors que dans la stratégie de déploiement proposée dans la première contribution, l'objectif est d'augmenter la couverture (visuelle ou radio) du réseau en ayant comme données préliminaires le nombre et l'emplacement des capteurs. Ici, l'objectif est de déployer le nombre de capteurs nécessaires afin de couvrir au maximum la zone d'intérêt tout en évitant la redondance de données.

1.1.3 Suivi de cible non-communicante dans un environnement homogène

Le mouvement de la cible (trajectoire, vitesse, etc) impacte sur la façon de la suivre. C'est en partant de ce constat que nous avons proposé notre dernière contribution. Analyser ce mouvement permettrait de le prédire plus efficacement et ainsi de n'activer que les nœuds qui se trouvent sur la trajectoire de la cible. La cible étant **non-communicante** et le réseau déployé ne disposant pas de capteurs de présence, un mécanisme de réveil périodique des capteurs est implémenté. Nous proposons donc deux algorithmes de suivi prédictifs comportant chacun cinq phases : réveil, détection, localisation, prédiction et sélection du capteur successeur. Le premier nommé PTA (*Predictive Tracking Algorithm*) est adapté aux cibles évoluant de façon linéaire, il utilise le filtre de Kalman pour prédire le déplacement de la cible. Le second nommé PMT^2 (*Predictive Mobile Target Tracking*) est conçu pour les cibles évoluant de manière non-linéaire. Il utilise une version améliorée du Filtre de Kalman Étendu (FKE) combinée à un mécanisme de détection de changements de direction appelé CuSum (*Cumulative Summury*).

1.2 Organisation du document

Ce manuscrit comporte six chapitres organisés suivant une structure logique intégrant la complexité du contexte entourant la cible. Les chapitres s'enchainent selon la progression suivante :

Le chapitre 2 décrit un état de l'art sur les réseaux de capteurs sans fil et sur l'application visée qui n'est autre que le suivi de cible mobile. Nous commençons par présenter les réseaux de capteurs sans fil, leurs domaines d'application et leurs caractéristiques physiques et architecturales. Nous nous attardons plus spécifiquement sur les réseaux de capteurs multimédia sans fil et étudions les caractéristiques qui leurs sont propres. Enfin, nous décrivons ce qu'est le suivi de cible mobile, nous classifions les solutions existantes dans la littérature et discutons les métriques d'évaluation de ces dernières. Un état de l'art plus spécifique au contexte est présenté dans chaque chapitre.

Le chapitre 3 est dédié à notre première contribution, à savoir le suivi de cible **communicante**. La solution proposée incluant une stratégie de déploiement est décrite, un positionnement bibliographique sur les solutions considérant ce type de cible est réalisé, *CTC* notre algorithme de suivi est ensuite détaillé. Pour finir, une évaluation des performances menée par simulation est présentée.

Le chapitre 4 introduit *CTA*, un algorithme de suivi pour cible **non-communicante**. Le déploiement d'un réseau hétérogène y est proposé afin de palier aux contraintes liées aussi bien à la détection d'une cible non-communicante qu'aux limitations énergétiques dont souffrent les réseaux de capteurs sans fil. À cet effet, un état de l'art résumant les avantages associés à l'utilisation de ce type de réseau hétérogène est présenté. *CTA* est ensuite introduit et ses performances discutées.

Le chapitre 5 décrit quant à lui notre dernière contribution. Nous nous intéressons ici aux modèles de mobilité en fonction desquels la cible évolue et étudions leurs impact sur la prédiction du mouvement de celle-ci. Nous proposons deux algorithmes prédictifs de suivi de cible non-communicante nommés respectivement *PTA* et *PMT*². Alors que dans *PTA* le filtre de Kalman dédié aux systèmes à évolution linéaire est utilisé, dans *PMT*² une version étendue de ce filtre pour les systèmes non-linéaire couplée à un mécanisme de détection de changements brusque sont exploités. Une étude de performances de ces algorithmes conclut ce chapitre.

Le dernier chapitre conclut cette thèse et introduit des idées et perspectives nouvelles qui permettront d'étendre ce travail.

Chapitre 2

État de l'art

Sommaire

2.1 Les réseaux de capteurs sans fil	17
2.2 Vers les réseaux de capteurs multimédia sans fil	22
2.3 Le suivi de cible mobile	25
2.4 Conclusion	31

L'ÉMERGENCE des réseaux de capteurs sans fil ouvre la voie à de nouvelles applications. Ces dernières apportent de nouveaux défis aussi bien scientifiques que technologiques qui ont retenu l'attention des chercheurs au cours de ces dernières années.

Dans ce chapitre, comme tout au long de cette thèse, nous nous intéressons au suivi de cible mobile dans les réseaux de capteurs sans fil. Le suivi de cible est une application qui suscite l'intérêt du monde de la recherche si on considère les nombreux domaines d'utilisation. Cet état de l'art porte à la fois sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs caractéristiques et leurs contraintes mais aussi sur l'application visée. Un positionnement bibliographique plus spécifique à chaque contexte entourant les solutions proposées est présenté dans chaque chapitre.

Dans la section suivante, nous nous attachons à décrire les bases nécessaires à la compréhension des réseaux de capteurs sans fil. L'architecture, les applications et les spécificités de ce type de réseaux sont les points abordés. La section 2.2 décrit les réseaux de capteurs multimédia sans fil et les contraintes spécifiques liées aux données qui y transitent. La section 2.3 quant à elle détaille les fondamentaux du suivi de cible dans les réseaux de capteurs sans fil, une classification ainsi que des méthodes d'évaluation de ces solutions y sont proposées.

2.1 Les réseaux de capteurs sans fil

Les dernières avancées technologiques dans les domaines des communications sans fil ont permis le développement de capteurs sans fil à faible consommation énergétique. Ces petits dispositifs sont inter-connectés les uns aux autres pour former des réseaux de capteurs sans fil et sont ensuite déployés dans une zone d'intérêt afin de gérer des tâches spécifiques. L'attrait croissant suscité par les réseaux de capteurs sans fil aussi

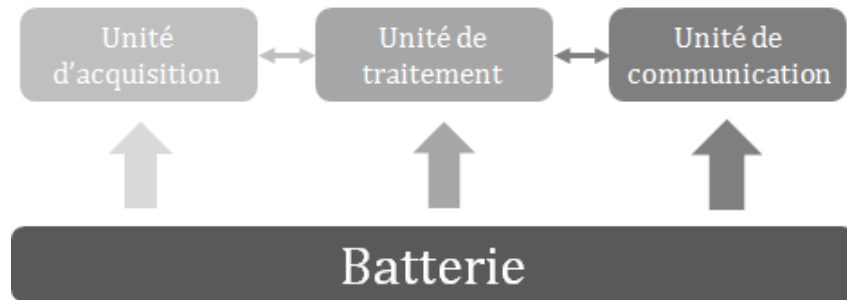


FIGURE 2.1 – Composants physiques d'un capteur sans fil.

bien dans monde de la recherche que celui de l'industrie peut aisément être compris si on considère le large éventail d'applications qu'offre ce type d'infrastructures [7] [63]. Ils offrent aussi une perspective intéressante, celle de réseaux pouvant s'autogérer sans interventions humaine faisant d'eux des composants clés de *l'Internet des objets*. Un réseau de capteur sans fil peut être plus ou moins dense, en fonction de la taille de la zone de déploiement et de l'application visée.

Le plus souvent, les capteurs disposent de composants leur permettant d'évaluer des caractéristiques physiques de l'environnement dans lequel ils sont déployés (température, humidité, etc). Cependant, certains peuvent directement interagir avec ce milieu environnement par le biais d'éléments embarqués puissants. Toutes les informations collectées dans un réseau de capteurs sans fil convergent vers un puits (*Sink*) ou collecteur, chargé de les traiter et de les mettre à disposition des utilisateurs.

2.1.1 Architecture physique d'un capteur sans fil

Les capteurs sans fil sont des petits dispositifs généralement dotés de quatre composants élémentaires : une unité de capture, une unité de traitement, une unité de communication et une batterie [7]. La figure 2.1 illustre les composants physiques élémentaires d'un capteur sans fil.

Les capteurs peuvent aussi être dotés d'une unité de localisation pour connaître leur position ou encore d'une unité de mobilité leur permettant de se déplacer. Ces composants sont optionnels et dépendent de l'application visée.

2.1.1.1 Unité de capture

L'unité de capture ou d'acquisition est comme son nom l'indique en charge de capturer des mesures sur le phénomène observé et de les transmettre à l'unité de traitement. Un CAN (Convertisseur Analogique-Numérique) gère la conversion des signaux analogiques provenant de l'unité de capture en signaux numériques interprétables par l'unité de traitement.



FIGURE 2.2 – Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil.

2.1.1.2 Unité de traitement

L'unité de traitement ou processeur est souvent associée à une petite unité de stockage. Elle récupère les données acquises par l'unité de capture, les analyse, les traite et les transmet à l'unité de communication.

2.1.1.3 Unité de communication

Habituellement dotée d'un transcepteur radio, cette unité est en charge d'émettre et de recevoir les données produites par l'unité de traitement, fournissant ainsi aux capteurs la capacité de communiquer avec les autres composants du réseau.

2.1.1.4 Batterie

Chaque capteur dispose d'une batterie pour alimenter le reste de ses composants. Néanmoins, en raison de sa taille, elle est assez limitée. L'énergie devient donc une ressource précieuse car la durée de vie de la batterie influe directement sur celle des capteurs.

2.1.2 Domaines d'application

Les réseaux de capteurs sont généralement déployés dans une zone donnée pour observer un phénomène spécifique. En fonction du type d'informations récoltées, ils peuvent être destinés à plusieurs domaines d'applications parmi lesquels nous comptons les applications : militaires, environnementales, médicales, domotiques ou encore industrielles [7]. La figure 2.2 illustre quelques applications possibles.

2.1.2.1 Applications militaires

Les réseaux de capteurs sans fil sont particulièrement adaptés aux applications militaires étant donné leur faible coût et leur rapidité de déploiement. Dans ce domaine,

ils peuvent être utilisés pour : la surveillance de zones d'intérêt [9], la surveillance et la gestion des troupes et des munitions, l'évaluation des pertes et dommages post-bataille ou encore la détection d'attaques biologique ou chimique [25] .

2.1.2.2 Applications environnementales

Parmi les applications environnementales des réseaux de capteurs sans fil, nous pouvons citer : la surveillance des flux migratoires d'oiseaux ou de certains animaux [52] [57], la surveillance des domaines forestiers et la détection d'incendies facilitant ainsi la lutte contre les feux de forêt [21], le suivi agricole, la détection de pollution dans les sites urbains ou les fuites de produits toxiques dans les sites industriels et bien d'autres applications encore [69].

2.1.2.3 Applications médicales

Les réseaux de capteurs sans fil trouvent facilement leur utilité dans le domaine médical. À l'aide de micro-capteurs déployés sur le corps humain ou éventuellement implantés, une surveillance permanente des constantes vitales d'un patient peut être assurée [34]. De plus, certains diagnostics peuvent être facilités en mesurant en temps réel ou en étudiant certaines données physiologiques (tension artérielle, rythme cardiaque, etc) collectées et stockées dans la mémoire des capteurs. Enfin, certains comportements inhabituels peuvent être détectés (chute, évanouissement, etc).

2.1.2.4 Applications domotiques

Avec les progrès technologiques, les capteurs sans fil peuvent être embarqués dans des appareils du quotidien (thermostat, lampe, interrupteurs, etc) et les appareils électroménagers [62]. Ces capteurs peuvent interagir aussi bien les uns avec les autres ou bien avec un réseau externe via internet permettant ainsi à l'utilisateur de contrôler ses appareils à distance. Nous pouvons aisément imaginer la multitude d'actions et de scénarios dans le cadre de la maison intelligente qui deviennent possibles telles que : la lumière s'allume quand je rentre dans une pièce, le chauffage et la climatisation s'ajustent en fonction de la température de certains points de mesures et bien d'autres scénarios encore.

2.1.2.5 Applications industrielles

Il est possible d'utiliser les réseaux de capteurs sans fil dans des contextes industriels. À titre d'exemple nous citons : le suivi de chaîne de production, la gestion d'inventaire, le contrôle de qualité, etc. De façon générale, les réseaux de capteurs sans fil permettent aux entreprises d'améliorer la qualité de service tout en réduisant les coûts [24].

2.1.3 Caractéristiques et Contraintes

En raison de leur petite taille et des contraintes de coût imposées, les capteurs sont généralement caractérisés par de fortes limitations en termes de puissance de calcul, de portée de communication et tout particulièrement d'énergie. D'un autre côté, ces

mêmes capteurs doivent disposer de facultés d'auto-gestion et de mesures à la hauteur des applications pour lesquelles ils ont été conçus. Ces caractéristiques contradictoires représentent le principal défi auquel doivent faire face les concepteurs.

2.1.3.1 Puissance de calcul

Dans les réseaux de capteurs sans fil, les nœuds disposent de la faculté d'extraire, de traiter et de combiner des données, tout en offrant accès à celles-ci, interagissant ainsi avec leur environnement. Les contraintes de taille, d'énergie et de coût imposées régissent la production de capteurs, limitant ainsi la puissance de calcul de l'unité de traitement [7]. À titre d'exemple, l'Imote2 de MEMSIC dispose d'un processeur 32 bits cadencé en mode économie à 13 Mhz et d'un espace mémoire de 256 Ko. Le TelosB a un processeur de 16 bits pour une fréquence de 8 Mhz et un espace mémoire total de 58 Ko [2]. En dépit de leur disparité, les capteurs doivent pouvoir collaborer et s'échanger des informations pour des applications communes.

2.1.3.2 Communication

Les technologies de communication sans fil sont de nos jours bien répandues. La plus part des réseaux de capteurs sans fil utilisent des communications radio même si des alternatives (laser, infrarouge) existent [63]. L'énergie dépensée pour la communication et sans conteste la plus élevée, la nécessité de protocoles faibles consommation s'accroît. Les réseaux de capteurs sans fil bénéficient donc de mécanismes de communication adaptés, leur assurant un faible coût énergétique. Le plus répandu est le standard IEEE 802.15.4 [17] qui offre un débit maximal de 250 kb/s, une taille de trame réduite, une portée de transmission pouvant atteindre les 100m et un mode veille intégré. De plus, les réseaux de capteurs sans fil disposent de protocoles de routages non-hiérarchiques tel que le protocole réactif AODV [61] ou hiérarchiques, plus adaptés aux grands réseaux. Le choix du protocole de routage diffère donc selon l'application, l'architecture et la densité du réseau. Parmi les atouts des réseaux de capteurs sans fil nous pouvons citer : l'absence d'infrastructures fixes et de câblages, la rapidité et facilité de déploiement, le passage à l'échelle, la gestion de nœuds mobiles, etc. Néanmoins, l'absence de gestion centralisée implique la conception de mécanisme d'auto-gestion permettant aux capteurs de découvrir leur environnement (capteurs voisins, position, structures, etc).

2.1.3.3 Énergie

L'énergie est la plus importante contrainte à laquelle sont soumis les capteurs, la durée de vie du réseau étant directement liée à l'autonomie des capteurs déployés. L'accès physique à ces nœuds est souvent impossible compte tenu des applications visées : à titre d'exemple la surveillance de feux de forêt ou de zones militaires dans lesquelles les capteurs sont disséminés par voie aérienne, ou bien la surveillance d'infrastructures urbaines comme les ponts, les capteurs étant incorporés à la structure même. Beaucoup de recherches s'orientent donc naturellement vers la gestion économe de cette ressource précieuse. Les solutions proposées interviennent à tous les niveaux, aussi bien pour la partie communication en proposant des protocoles d'échanges et de

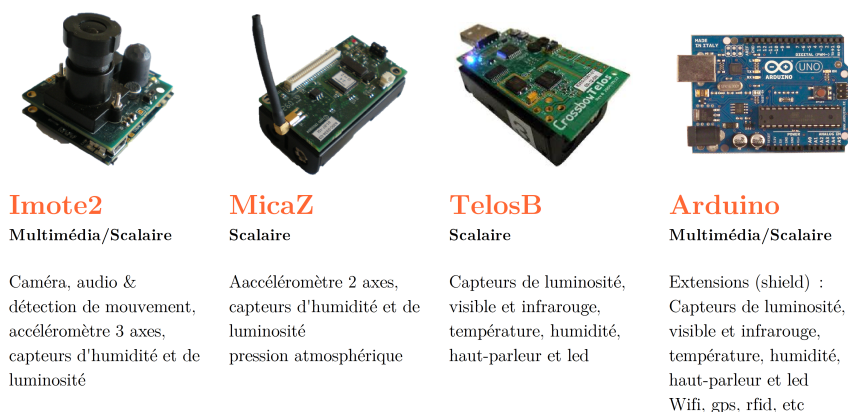


FIGURE 2.3 – Panel de capteurs.

routage basse consommation mais aussi en proposant des architectures et des organisations adaptées aux différents contextes. Des mécanismes d'endormissement périodique, de réduction de taille des données échangées : tout est repensé pour réduire la consommation énergétique.

2.1.4 Panel de capteurs existants

Les capteurs sans fil ont beaucoup évolués durant cette dernière décennie. Les constructeurs s'attellent à proposer des nœuds de plus en plus petits avec des performances et des durées de vie plus importantes. Le tableau 2.1 résume ceratines caractéristiques matérielles d'un panel de capteurs appartenant principalement à un des leaders du marché : MEMSC (anciennement Crossbow). La figure 2.3 quant à elle illustre un panel de capteurs sans fil utilisés dans le laboratoire LIGM.

2.2 Vers les réseaux de capteurs multimédia sans fil

Avec la miniaturisation de certains dispositifs de captures multimédia tels que les caméras et les microphones, les réseaux de capteurs multimédia sans fil ont vu le jour. Dans ces réseaux, les capteurs capturent et traitent des flux multimédia (son, image, vidéo) élargissant un peu plus leur champ applicatif. En plus de la capacité de capturer des flux multimédia, ces réseaux peuvent traiter et fusionner en temps réel des données multimédia provenant de sources hétérogènes et interagir ainsi avec l'environnement physique. La notion de réseaux de capteurs multimédia sans fil provient de la fusion de deux concepts : les réseaux de capteurs sans fil et les systèmes de surveillance classiques apportant ainsi la flexibilité de l'un et l'efficacité de l'autre [6].

2.2.1 Caractéristiques et contraintes

En plus des contraintes communes partagées avec les réseaux de capteurs sans fil classiques telles que les contraintes énergétiques, les réseaux de capteurs multimédia

TABLE 2.1 – Caractéristiques matérielles d'un panel de capteurs sans fil existants.

Plate-forme	Fabricant	Unité de traitement	unité de communication	Batterie
Imote2	MEMSIC	Intel PXA271 SRAM 256KB SDRAM 32MB Mémoire flash 32MB	CC2420 bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz Débit 250 kbps	3.2-4.5 V
IRIS	MEMSIC	Atmel ATmega1281 Mémoire de programme 128 Ko RAM 8 Ko Mémoire flash 512 Ko EEPROM 4Ko	Radio transcepteur 802.15.4 bande ISM de 2405 à 2480 MHz Débit 250 kbps	2.7-3.3 V
MICAz	MEMSIC	Atmel ATmega128L Mémoire flash 128K bytes EEPROM 4K bytes	Radio transcepteur 802.15.4 bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz Débit 250 kbps	2.7-3.3 V
TELOSB	MEMSIC	Texas Instruments MSP430 Mémoire flash 48K bytes EEPROM 16K bytes RAM 10 K bytes	CC2420 bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz Débit 250 kbps	2.1-3.6 V
Arduino Uno	Arduino	ATmega328 Mémoire flash 32K bytes EEPROM 1 K bytes SRAM 2 K bytes	Xbee shield 802.15.4 bande ISM de 2400 à 2483.5 MHz Débit 250 kbps	5 V

sans fil souffrent de contraintes bien spécifiques liées principalement aux données multimédia qui circulent. Parmi ces contraintes nous citons : la limitation en bande passante, les demandes spécifiques en QoS, les contraintes temps réel, la capacité changeante du canal de transmission, le codage du flux multimédia, etc [6]. Ci-dessous sont décrits les facteurs principaux engendrant les contraintes spécifiques liées aux réseaux de capteurs multimédia sans fil.

2.2.1.1 Capture et traitement d'image

Dans les systèmes de surveillance classiques, les traitements des images, l'extraction d'informations et la compression sont effectués au niveau local au niveau de la source. Alors que ces actions sont aisées à mettre en oeuvre dans ce type de systèmes qui ne connaissent pas de limitations de ressources, la tâche se complexifie dans le contexte des réseaux de capteurs multimédia sans fil, compte tenu de leurs limitations aussi bien matérielles qu'énergétiques.

2.2.1.2 Besoin en mémoire

Alors que le codage de données simples (scalaires) ne nécessite que quelques octets : de 1 à 8 en fonction du capteur, le codage d'une image nécessite l'utilisation d'un nombre beaucoup plus important d'octet. La taille mémoire nécessaire dépend à la fois de la résolution et du format de l'image. Une image de 128×128 pixels utilisera 4 fois plus d'espace mémoire qu'une image 64×64 [37]. Ces critères sont à prendre en considération lors du développement de protocoles de communication pour les réseaux de capteurs sans fil.

2.2.1.3 Transmission de données multimédia

La transmission de données est une des actions les plus consommatrice d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil. L'utilisation de protocoles de communication adaptés est donc nécessaire. Dans les réseaux de capteurs classiques où des données simples sont capturées, celles-ci peuvent être fusionnées et envoyées en un seul paquet. Pour les données multimédia, la tâche s'avère plus compliquée si on considère la taille des images. En effet, une seule image doit généralement être fragmentée en plusieurs paquets.

2.2.2 Domaines d'application

Les réseaux de capteurs multimédia sans fil n'étendent pas seulement le champ applicatif des réseaux de capteurs déjà existants mais améliorent aussi certaines applications déjà existantes [5].

2.2.2.1 Surveillance multimédia

La surveillance multimédia peut être utilisée en complément aux systèmes de surveillance classiques. Les capteurs étant faciles à déployer, ils permettent de couvrir plus de surface et d'obtenir un plus grand nombre de perspectives. Les images et les vidéos

capturées fournissent des informations complémentaires et appréciables sur l'environnement ou l'événement surveillé. L'information multimédia et particulièrement l'information visuelle est très riche et fait partie des informations les plus exploitées par l'être humain pour percevoir son environnement. Dans certaines applications, l'identification des objets traversant le réseau est nécessaire. C'est le cas pour certaines applications de surveillances environnementales comme l'étude du comportements de certains animaux. Cette identification n'est possible qu'à travers la capture d'images ou de vidéos. D'autres applications n'ont pas directement besoin d'enregistrement multimédia mais cela est fortement appréciable. À titre d'exemple, dans la surveillance des feux de forêt, les capteurs sans fil scalaires sont en mesure de calculer la température afin de détecter les départs de feux, mais la capture d'images aide à avoir une idée plus précise de la situation. De façon plus générale, les données scalaires aident à se faire une idée de la situation mais les données multimédia permettent d'identifier et de classer plus précisément l'événement étudié [6].

2.2.2.2 Gestion et contrôle de trafic

Grâce au déploiement des réseaux de capteurs multimédia sans fil, des applications de gestion de trafic routier deviennent possibles. Les accidents et les ralentissements peuvent être détectés en traitant les images de la circulation capturées par les capteurs, l'information est ensuite relayée afin d'éviter aux automobilistes les voies encombrées et de ce fait congestionner encore plus le trafic. En outre, des systèmes de stationnement intelligent permettant de guider les voitures directement aux places libres dans les parkings deviennent facilement réalisables [13].

2.3 Le suivi de cible mobile

Le suivi de cible est une application qui consiste à détecter et à localiser une cible mobile tout au long de son évolution dans une zone d'intérêt. Cette application est essentielle à plusieurs domaines tels que la surveillance militaire, environnementale, industrielle ou encore les applications liées à *"la maison intelligente"* [56]. Dans la vie réelle, deux types de cibles existent : les cibles **communicantes** et les cibles **non-communicantes**. Les cibles communicantes sont des cibles dites *coopératives* qui émettent des signaux établissant ainsi un contact avec le réseau. Les cibles non-communicantes quant à elles sont non-collaboratives et peuvent dans certains cas être hostiles. Cette différenciation entraîne des conséquences sur la façon de gérer le processus de suivi.

En dépit du type de cible à suivre, les applications de suivi partagent des caractéristiques communes : d'une part elles doivent faire face aux contraintes liées au réseau utilisé (limitation énergétique, bande passante, portée de communication, etc), d'autre part, la position de la cible doit être restituée avec précision et en considérant d'éventuelles contraintes temps réel.

Le suivi de cible mobile dans les réseaux de capteurs sans fil est une application qui a gagné en popularité pour les raisons suivantes [47] :

- le prix décroissant des capteurs sans fil permet de les déployer en grand nombre, cette densité croissante permettant de couvrir de plus grandes zones et d'obtenir



FIGURE 2.4 – Classification des algorithmes de suivi dans la littérature.

- plusieurs perspectives de celles-ci offrant ainsi une meilleure qualité de suivi ;
- l'hétérogénéité des capteurs permet de capturer des données complémentaires sur la cible (taille, forme, type, etc), cette diversité de données aide à fournir des informations plus précises ;
 - alors que les systèmes de surveillance classiques utilisent une approche centralisée, le suivi dans les réseaux de capteurs privilégie une approche distribuée plus évolutive.

Les réseaux de capteurs multimédia sans fil sont les réseaux les plus adaptés au suivi de cible. À l'aide des caméras qui équipent les capteurs, la cible peut être détectée, identifiée, classifiée et localisée.

2.3.1 Classification des algorithmes de suivi dans la littérature

Plusieurs classifications pour les algorithmes et protocoles de suivi ont été proposées dans la littérature [64] [11] [56]. Quatre catégories prédominent : solutions basées sur une architecture hiérarchique, solutions basées sur une architecture en cluster, solutions prédictives et enfin solutions hybrides (figure 2.4). Cette classification tient compte aussi bien de l'architecture du réseau que du processus de réveil successif des capteurs.

2.3.1.1 Solutions basées sur une architecture hiérarchique

Les solutions basées sur une architecture hiérarchique organisent le réseau en structure ou en graphe hiérarchique. Les sommets représentent les nœuds et les arêtes définissent les liens entre les nœuds pouvant directement communiquer. Dans cette architecture, lorsque la cible est détectée, l'information est remontée au nœud-racine qui se charge du traitement et de la fusion des données [74] [91].

Dans [39] un coût est assigné à chaque arête du graph formant le réseau, le coût attribué dépend de la distance Euclidienne entre deux nœuds. La construction de

l'arbre hiérarchique dépend donc de ces coûts. Les nœuds-feuilles sont utilisés pour suivre la cible et les informations obtenues sont envoyées au collecteur via les nœuds intermédiaires. Ces derniers conservent une copie des informations transférées, ainsi, si des changements surviennent, une mise à jour est transférée au collecteur. Cette solution présente un inconvénient majeur : la représentation du réseau sous forme d'arbre étant logique, une arête peut être représentée par plusieurs sauts et augmenter le coût de la communication. Dans [44], une approche à deux phases est proposée. La première phase vise à réduire le taux de mise à jour des informations récoltées alors que la deuxième vise à réduire la consommation énergétique.

Le principal inconvénient des solutions basées sur une architecture hiérarchique est que le traitement des données soit centralisé au niveau du nœud racine, cela engendre un coût d'acheminement des informations non-négligeable. De plus, l'aspect centralisé des traitements fige l'évolution du réseau.

2.3.1.2 Solutions basées sur une architecture en cluster

Le réseau est organisé en clusters composés de nœuds-parents et de nœuds-fils. Les clusters peuvent être formés de façon statique au moment du déploiement du réseau ou bien de manière dynamique durant le processus de suivi, en se basant sur des critères tels que : la position de la cible, la puissance de calcul du nœud ou encore son énergie résiduelle. Afin d'équilibrer la charge des tâches à réaliser, celles-ci sont partagées entre les différents composants du cluster [77] [48] [33].

Dans [15] les auteurs proposent CODA (*A Continuous Object Detection and Tracking Algorithm*), un algorithme de suivi basé sur une architecture en cluster hybride : statique et dynamique. Le réseau déployé est préalablement décomposé en cluster avec un nœud-parent et des nœuds-fils. Lorsque la cible est détectée par un des nœuds-fils, l'information est remontée au nœud-parent qui dans un premier temps délimite la zone où se trouve l'objet en exploitant les données reçues. Dans un second temps, il construit des clusters dynamiques en fonction de la zone délimitée en élisant un ensemble de nœuds-fils pouvant faire partie ou non de son propre cluster afin de suivre l'évolution de l'objet. Cette solution est particulièrement adaptée aux suivis d'objets de grande taille (camion, voiture, matériel industriel, etc).

Les auteurs de [48] proposent un algorithme de suivi de cible **non-communicante** pour les réseaux de capteurs multimédia sans fil. Cet algorithme a pour objectif la sélection des capteurs qui participeront au processus de suivi en se basant sur un modèle probabiliste. Lorsqu'un capteur détecte la présence de la cible, il devient nœud-parent et diffuse l'information. Les capteurs voisins qui reçoivent cette information calculent leur probabilité de détecter la cible. Si elle dépasse un seuil prédéfini, ils activent leurs caméras pour procéder à la localisation.

Ce type d'architecture offre un certain nombre d'avantages parmi lesquels : la facilité de passage à l'échelle, la diminution du trafic et l'efficacité énergétique. Cependant, une panne au niveau des nœuds, particulièrement au niveau des nœuds-parents peut avoir de fortes conséquences sur le processus de suivi et le relai d'informations.

2.3.1.3 Solutions prédictives

Dans cette catégorie, la trajectoire de la cible est prédite pour n'activer que les capteurs se trouvant sur celle-ci et ainsi économiser de l'énergie. Cette prédiction peut être réalisée à l'aide de modèles prédictifs parmi lesquels : les filtres de Kalman [65][89], ou encore en utilisant des mécanismes probabilistes comme les chaînes de Markov [36][83].

Dans [85] un mécanisme de prédiction permet de réduire l'énergie consommée par le module radio en limitant les transmissions longues distances, à titre d'exemple les communications entre les nœuds et la station de base. Dans la solution proposée la prédiction est effectuée aussi bien au niveau de la station de base qu'au niveau du nœud qui a détecté la cible. Cette double prédiction assure une précision dans la prédiction du déplacement de la cible. Lorsque le mouvement réel est compatible avec celui prédit, la mise à jour est remontée jusqu'au puits.

Dans [86] les auteurs se focalisent aussi sur l'économie d'énergie en réduisant cette fois le nombre de capteurs activés. Le processus de suivi y est décomposé en trois phases : prédiction, réveil et récupération. Dans la première phase, le mouvement de la cible est prédit. Dans la seconde phase, les capteurs susceptibles de la détecter sont réveillés. La troisième phase est initiée uniquement lorsque la cible est perdue en raison d'une erreur dans la prédiction.

Les solutions prédictives ont l'avantage certain d'exploiter au mieux les informations disponibles aussi bien sur la cible que sur l'environnement. Elles restent cependant inadaptées à certains contextes critiques (applications militaires, détection d'intrusion, etc) ou la perte, même momentanée de la cible est inenvisageable.

2.3.1.4 Solutions hybrides

Comme son nom l'indique, cette catégorie inclue les solutions où plusieurs approches sont combinées. À titre d'exemple, des solutions prédictives basées sur des architectures hiérarchiques sont proposées dans [80][91] alors que dans [16] un mécanisme prédictif implémenté sur un réseau organisé en clusters est présenté. Ce type de solutions permet de combiner et d'exploiter au mieux les avantages des différents schémas.

Une solution de suivi efficace et complète doit implémenter des mécanismes : de détection ; de localisation, de relai d'informations entre les nœuds et d'activation. Le tableau 2.2 détaille les mécanismes implémentés en fonction de la classe pour chacune des solutions référencées dans cette thèse.

2.3.2 Classification des algorithmes de suivi proposée

Dans ce travail, nous proposons une classification plus générale qui s'affranchit de l'architecture réseau et se concentre sur les méthodes de réveil des capteurs. En effet, les capteurs sans fil étant contraints en ressources, l'idée est de n'activer que ceux qui se trouvent sur la trajectoire de la cible pendant que le reste se maintient en état d'inactivité. La classification comprend donc deux catégories : algorithmes réactifs et algorithmes proactifs. Dans les algorithmes de suivi réactifs, les capteurs sont activés de manière réactive, en fonction des besoins immédiats et au fur et à

TABLE 2.2 – Comparaison des solutions de suivi

Type de solution de suivi	Détection	Localisation	Relai d'informations	Mécanismes d'activation
Architecture hiérarchique [74] [91]		✓	✓	✓
Architecture hiérarchique [39] [44]		✓		
Architecture hiérarchique [38]	✓	✓	✓	✓
Architecture en cluster [50] [77] [53]		✓		
Architecture en cluster [84]	✓	✓	✓	✓
Architecture en cluster [81] [48]	✓	✓		
Architecture en cluster [15] [18] [41] [42]		✓	✓	✓
Solutions prédictives [65] [83] [86] [68]		✓	✓	✓
Solutions prédictives [36]			✓	✓
Solutions prédictives [76]	✓	✓	✓	✓
Solutions hybrides [80] [16]		✓	✓	✓

mesure du déplacement de la cible [48] [53]. Alors que dans les algorithmes de suivi proactifs, les besoins sont anticipés, la trajectoire empruntée par la cible est prédite et les capteurs sont activés en fonction des estimations [41] [68] [86]. Les solutions réactives sont préconisées lorsque peu d'informations sur l'environnement de la cible sont disponibles, les solutions proactives sont quant à elles recommandées lorsqu'un minimum de données sur le mouvement de la cible sont connues. Nous nous intéressons dans cette thèse au suivi de cible et nous proposons des solutions à cette problématique. Un positionnement bibliographique plus détaillé listant quelques solutions pertinentes faisant partie de chaque catégorie est présenté dans chacun des chapitres en fonction du contexte particulier.

2.3.3 Métriques d'évaluation

Deux métriques clés sont utilisées généralement pour évaluer les stratégies de suivi de cible dans les réseaux de capteurs sans fil : la précision du suivi et la consommation énergétique. L'objectif final de toute solution efficace étant de gérer le compromis entre les deux. D'autres métriques comme : le nombre de messages échangés ou perdus, les délais de traitements, le taux de perte de la cible ou encore le passage à l'échelle peuvent aussi être utilisées.

2.3.3.1 Précision du suivi

Comme son nom l'indique cette métrique sert à évaluer la précision et l'efficacité de la solution de suivi de cible proposée. Elle intègre aussi bien la capacité et la vitesse

à laquelle la cible est détectée que la précision de la localisation. Elle peut être mesurée en fonction du nombre de positions (coordonnées) obtenues sur une trajectoire donnée ou bien en terme de déviation moyenne (écart) par rapport à la trajectoire réelle. La déviation moyenne est obtenue en calculant la distance Euclidienne entre la position réelle de la cible à un instant donné et celle calculée par la solution proposée au même instant.

2.3.3.2 Consommation énergétique

La consommation énergétique est une métrique d'évaluation importante, particulièrement dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil où la durée de vie du réseau dépend du coût énergétique des applications implémentées. De nombreux facteurs influent directement sur l'énergie tels que le nombre de messages échangés durant le processus de suivi où encore le type de données à traiter (multimédia, scalaires, etc). Elle peut être évaluée en terme d'énergie consommée, d'énergie résiduelle ou de durée de vie moyenne d'un nœud.

2.3.3.3 Nombre de message échangés

Le nombre de messages échangés représente le coût de communication d'une solution de suivi. Il est obtenu en comptabilisant le nombre de messages collaboratifs échangés durant le processus de suivi. Ce nombre impacte d'une part sur le taux de surcharge du réseau et d'autre part sur la consommation énergétique. Pour qu'une solution de suivi soit viable, il faut que ce nombre soit réduit au maximum.

2.3.3.4 Délai de traitement

Cette métrique peut être mesurée en terme de temps de latence, c'est à dire le temps entre l'entrée effective de la cible dans la zone d'intérêt et le temps de sa première détection par un capteur. Elle peut aussi être mesurée en délai de traitement local au niveau des capteurs, ce délai dépend des caractéristiques matérielles des nœuds déployés (vitesse de calcul, envoi/réception de message) et est lié à la vitesse de déplacement de la cible. Plus cette vitesse est importante plus ce délai doit être réduit afin d'éviter les réveils tardifs des capteurs et par conséquent la perte de cibles.

2.3.3.5 Taux de perte de la cible

Le taux de perte de la cible représente le nombre de fois où la cible n'est pas détectée alors que celle-ci se trouve à la portée d'un capteur. Cette perte peut être due à des erreurs dans le mécanisme de réveil des capteurs et donc de détection ou bien à une faille dans le mécanisme de relai d'informations (exemple : une erreur dans la prédiction).

2.3.3.6 Passage à l'échelle

Cette métrique détermine la capacité d'évolution d'une solution de suivi. Une solution de suivi doit être efficace et ce quelque soit la densité du réseau déployé.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons défini et décrit ce qu'est un réseau de capteurs sans fil, l'architecture physique d'un capteur sans fil et ses fonctionnalités. Nous avons mis l'accent sur les réseaux de capteurs multimédia et discuté les contraintes liées aux données qui y transitent. Nous nous sommes ensuite intéressé au contexte applicatif qui n'est autre que le suivi de cible mobile. Nous avons aussi proposé une classification des algorithmes de suivi existants. Deux paramètres d'analyses clés sont considérés dans la réalisation des solutions pour le suivi de cible mobile dans les réseaux de capteurs multimédia : la qualité du suivi et l'économie d'énergie. Dans les chapitres suivants, nous nous attelons à décrire avec précision nos contributions.

Chapitre 3

Suivi de cible communicante

Sommaire

3.1	Motivations	34
3.2	Contexte et application	35
3.3	Algorithme de suivi de cible communicante-CTC	39
3.4	Simulations et évaluation de performances	47
3.5	Conclusion	54

DANS ce chapitre, nous nous intéressons au suivi de cible **communicante** dans les réseaux de capteurs multimédia sans fil. Une cible communicante est une cible équipée d'un module de communication lui permettant de transmettre des signaux ou des messages périodiques (messages *hello*, *balise*, etc) et ainsi de communiquer avec le réseau. Rappelons que le suivi de cible est une application qui consiste à détecter et à localiser la cible tout au long de son évolution dans une zone d'intérêt. Contrairement à une cible sans activité radio détectable, une cible communicante manifestant sa présence, va faciliter sa détection et réduire ainsi ce processus à la phase de localisation. Le suivi devient donc plus aisé à réaliser. L'intérêt de ce type de cible provient du grand nombre d'applications et de services réalisables. À titre d'exemple, en disposant de la position de la cible, des services personnalisés et automatisés peuvent lui être fournis (assistance médicale, orchestration d'actions dans le cadre de la maison intelligente, etc).

Nous proposons un algorithme de suivi collaboratif et distribué implémenté sur un réseau organisé en clusters et nommé CTC (*Cluster-based Tracking algorithm for Communicating target*) dont l'objectif principal est de gérer le compromis entre la précision du suivi et la consommation énergétique. Le suivi de cible y est cette fois décrit comme une application à quatre étapes : détection, sélection de capteurs, localisation et enfin, observation visuelle de la cible. Les algorithmes de suivi tirent leurs données des informations récupérées par le réseau. Le choix d'une architecture en cluster est motivé par son efficacité en terme de collaboration, traitement et partage de données.

Le réseau déployé est constitué de nœuds à capacité énergétique relativement importante jouant le rôle de nœuds-parents et de capteurs caméra sans fil assumant le rôle de nœuds-fils. Dans la mesure où la mobilité des capteurs n'est pas requise pour l'application visée, nous avons choisi un mécanisme d'association statique pour construire

les clusters. CTC permet aussi bien la communication inter-cluster qu'intra-cluster. Le traitement et la fusion de données se font au niveau des nœuds-parents qui sont en charge de sélectionner les nœuds-fils à activer. Cette décision est prise en se basant sur un modèle probabiliste.

Les performances de l'algorithme de suivi étant étroitement liées au déploiement préalable des nœuds dans la zone d'intérêt, nous proposons également une stratégie de déploiement en liaison avec l'algorithme de suivi. Nous y introduisons le concept de sous-zones pondérées. En effet, nous considérons que dans les environnements réalistes, certaines zones sont plus importantes à couvrir que d'autres. Elles sont donc pondérées en fonction de cette importance et ce poids est pris en considération lors du déploiement du réseau.

Pour résumer, nos contributions dans ce chapitre sont :

- une stratégie de déploiement pour les capteurs ;
- un algorithme collaboratif pour le suivi de cible communicante.

Ce chapitre est organisé comme suit. Dans la section 3.1 nous introduisons nos motivations, nous y exposons les contraintes liées aux cibles communicantes. Dans la section 3.2, nous détaillons quelques solutions de déploiement de capteurs, des techniques de localisation et de suivi de cible existantes dans la littérature. Nous discutons le modèle du système utilisé et la solution proposée dans 3.3. Nous décrivons l'environnement d'évaluation et discutons les résultats obtenus dans la section 3.4. Enfin, la section 3.5 conclut le chapitre.

3.1 Motivations

Comme nous l'avons mentionné précédemment, une cible **communicante** est une cible collaborative, non-hostile qui informe le réseau de sa présence par l'envoi périodique de messages sur son interface radio. À titre d'exemple, nous pouvons citer l'envoi périodique de messages *hello* en 802.11 [31] permettant la vérification de l'état des liens ou encore les demandes d'association (*balise*) en 802.15.4 [17]. Ce type de cible offre l'avantage certain de pouvoir être détectée rapidement dès qu'elle pénètre dans la zone d'intérêt et facilite ainsi le processus de suivi. Néanmoins, le surcoût lié aussi bien à la diffusion de signaux qu'à l'échange de messages entre la cible et le réseau n'est pas négligeable. Les capteurs sans fil mobiles, les voitures communicantes et les téléphones portables sont des exemples de cibles communicantes. On peut aussi transformer certaines cibles naturellement non-communicantes en cibles communicantes et cela en les équipant des dispositifs adéquats : un pompier peut être équipé de capteur pour pouvoir le suivre lors de ses interventions (incendie, sauvetage), de même un chien renifleur peut être doté de traceur et envoyé pour chercher la présence de vie dans des zones sinistrées et difficiles d'accès.

Pour rappel, le suivi de cible est une application qui consiste à détecter et à

localiser sur toute sa trajectoire, une cible traversant une zone d'intérêt. Une cible communicante manifeste sa présence en diffusant périodiquement des messages. La question qui se pose donc est : *comment exploiter le signal radio émis pour localiser précisément la cible ?* Plusieurs façons de réaliser cette tâche s'offrent à nous parmi lesquelles : l'exploitation du temps d'arrivée du signal, son angle d'arrivée ou encore sa puissance. Ces techniques sont décrites plus en détails dans la section 3.2.2.

Précisons que dans ce travail nous ne nous concentrons pas sur le type de solutions de géo-localisation, comme nous le verrons de nombreuses solutions existent. L'idée est de choisir celle qui s'adapte au mieux à notre contexte dans le but de développer notre algorithme de suivi.

3.2 Contexte et application

3.2.1 Stratégies de déploiement

Le placement de capteurs est une discipline à part entière et de nombreux travaux de recherches ont été proposés dans ce domaine [88] [93] [8]. L'objectif principal de n'importe quelle stratégie est d'assurer que l'événement à contrôler soit à tout moment à la portée d'un capteur au minimum. Le choix d'une solution doit donc prendre en compte le type de capteurs à placer, l'environnement de déploiement et la finalité de l'application implémentée. Un placement adéquat permet donc d'optimiser les performances de celle-ci.

Plusieurs classifications existent : dans [88] les stratégies de déploiements sont classées en fonction de l'objectif de l'application (couverture, connectivité, topologie, durée de vie du réseau, etc) ; dans [93] c'est plutôt en fonction des caractéristiques de mobilité du réseau (statique et dynamique) ; enfin, dans [8] les auteurs s'intéressent tout particulièrement aux capteurs à champs de capture directionnels et se focalisent sur les caractéristiques liées à ce dernier.

Lors de la conception d'une stratégie de déploiement, l'idéal est de satisfaire toutes les conditions suivantes :

- déployer le nombre optimal de capteurs ;
- éviter les chevauchements et donc la redondance de données ;
- éviter les obstacles et tout type d'occlusions.

De nombreuses solutions existent pour le déploiement des capteurs à champs de capture omnidirectionnels [14] [78], elles ont pour objectif d'augmenter la couverture d'une zone d'intérêt en y arrangeant les cercles représentant ces champs. Dans [30], le problème de couverture est considéré comme un problème décisionnel. En effet, pour les applications à fortes contraintes comme la surveillance militaire, chaque surface de la zone d'intérêt doit être couverte par au moins k -capteurs, la valeur de k étant fixée en fonction de l'application. L'idée la plus simple est de considérer chaque surface comme étant le champ de capture d'un capteur, ensuite de comptabiliser le nombre d'intersections avec les champs d'autres capteurs. Dans ce cas, le nombre k correspondrait au nombre d'intersections.

Dans [75] le problème connu sous le nom du problème de la *galerie d'art* est traité. Dans cette solution l'objectif est d'obtenir le nombre d'observateurs nécessaire afin que chaque point d'une salle d'exposition soit surveillé par au moins l'un d'entre eux. Cette solution a trouvé de nombreuses applications dans des domaines différents tels que le placement d'antennes dans les réseaux cellulaires ou plus généralement le déploiement des réseaux de capteurs sans fil.

Une autre approche utilisée lorsque la topologie de l'environnement est connue en avance consiste à placer les capteurs en fonction des zones à fortes fréquentations. Si on prend comme contexte applicatif le suivi de cible, le graphe de déplacement de

celle-ci est réalisé à l'aide d'outils tel que le diagramme de Voronoi [40]. Ensuite, les capteurs sont placés en fonction.

Dans certains cas, une panne au niveau de quelques nœuds peut survenir, provoquant une rupture de la connectivité du réseau et créant ainsi ce qu'on appelle des *trous* : des zones isolées non couvertes. Quelques travaux s'attellent à gérer cette problématique en proposant des mécanismes qui détectent ces *trous* et re-configurent le réseau en conséquence [71][67].

L'idée proposée dans [94] est la plus intéressante dans notre contexte. Les capteurs y sont considérés comme des entités émettant des forces virtuelles attractives ou répulsives. L'idée est semblable au fonctionnement des aimants et de leurs polarités : des polarités similaires entraînent une répulsion au contraire des polarités différentes qui entraînent une attraction. Dans le cas des capteurs, cela est interprété en terme de distance. Des capteurs placés loin les uns des autres s'attirent tandis que ceux qui se chevauchent se repoussent. Cette solution est expliquée plus en détails dans la sous-section 3.3.2. L'idée des forces virtuelles a été reprise dans de nombreux travaux. Par exemple, dans [72], une version étendue de l'algorithme qui tient compte de la connectivité du réseau est présentée. Le schéma proposé maximise le taux de couverture tout en garantissant la connectivité indépendamment de la densité du réseau. Dans [51], la solution est adaptée aux capteurs directionnels à trois dimensions (3D).

Contrairement aux réseaux de capteurs sans fil classiques où le champ de capture est supposé omnidirectionnel, dans les réseaux de capteurs multimédia sans fil, auxquels on s'intéresse dans notre travail, les capteurs disposent de champs de capture directionnels et limités. Le travail proposé dans [73] est l'un des premiers à considérer le déploiement des capteurs multimédia. La solution proposée permet à chaque nœud de calculer le meilleur angle de ré-orientation possible en tenant compte de l'orientation des voisins ainsi que des occlusions présentes dans le champ de vision du capteur multimédia.

Dans notre travail nous nous intéressons au suivi de cible communicante dans des environnements où un minimum d'informations sur la zone (obstacles, reliefs, etc) sont disponibles en amont. L'objectif à atteindre étant la gestion du compromis entre la précision du suivi et l'économie de ressources, la stratégie proposée doit maximiser la couverture visuelle et la connectivité du réseau tout en évitant la redondance de données.

3.2.2 Techniques de localisation

Dans les réseaux de capteurs sans fil, trois (03) méthodes d'exploitation du signal reçu par la cible prédominent : le temps d'arrivée, l'angle d'arrivée ou encore la force du signal [66]. Le temps d'arrivée du signal (*TOA : Time of Arrival*), exploite comme son nom l'indique, le temps d'arrivée et la vitesse de propagation du signal pour calculer la position de la source. L'angle d'arrivée du signal (*AOA : Angle of Arrival*), mesure la direction du signal pour localiser la cible. Plus précisément, cette technique consiste à mesurer l'angle entre la direction de propagation d'une onde et une référence donnée. La force du signal (*RSSI : Received Signal Strength Indicator*), est la méthode la plus utilisée et la moins coûteuse. Elle ne requiert pas de réception multi-antenne, d'horloge précise ou de traitements coûteux au niveau des nœuds. Cette technique consiste à mesurer la force du signal émis par la source pour la localiser. Plusieurs solutions sont

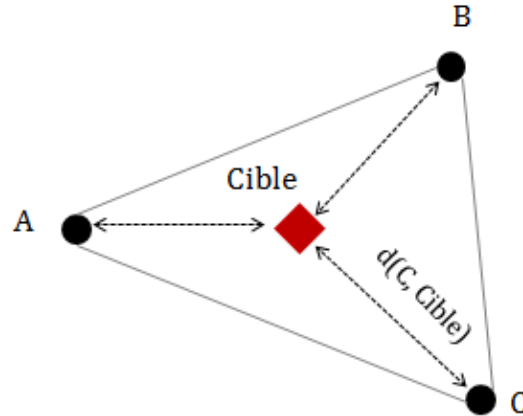


FIGURE 3.1 – Trilatération.

déclinées, l'une d'entre elles [46] consiste à collecter en amont l'empreinte (signature) du signal au niveau de chaque emplacement de la zone d'intérêt. Ensuite, la force du signal reçu est comparée à celles collectées permettant ainsi d'estimer les coordonnées de l'émetteur.

Une fois les mesures récoltées, une technique de géo-localisation est utilisée pour déterminer la position de la cible. La trilatération ou la triangulation sont les techniques communément utilisées [46]. Ces deux mécanismes exploitent les caractéristiques géométriques des triangles pour déterminer la position d'un point donné, trois (03) mesures représentant les coordonnées des sommets du triangle sont nécessaires. La trilatération exploite la distance entre des points de références. La triangulation quant à elle, exploite l'angle d'arrivée du signal par rapport à des points de références. Alors que les techniques basées sur la force et le temps d'arrivée du signal sont adaptées à la trilatération, celle basée sur l'angle d'arrivée du signal est mieux appropriée à la triangulation.

Dans ce travail, nous utilisons une technique de localisation basée sur la puissance du signal associée donc à la trilatération (figure 3.1). En effet, notre objectif étant la gestion du compromis entre la précision du suivi et la consommation énergétique, cette solution est celle qui convient le mieux.

3.2.3 Algorithmes de suivi réactifs

Il existe dans la littérature un nombre important de travaux de recherche concernant le suivi de cible mobile dans le contexte des réseaux de capteurs sans fil. Ces travaux peuvent être classifiés en deux principales catégories : solutions réactives et solutions proactives. Nous nous intéressons dans ce chapitre à la première catégorie. Dans celle-ci, le suivi est effectué de manière réactive au fur et à mesure du déplacement de la cible. La plupart des travaux de cette catégorie utilisent une architecture réseau en cluster. Ce type d'architecture offre des avantages tels que le passage à l'échelle, la diminution du trafic et l'efficacité énergétique. Ces clusters peuvent être créés de façon statique au moment du déploiement du réseau ou bien de manière dynamique durant le processus de suivi, en se basant sur des critères tels que la position, la puissance

de calcul ou encore l'énergie résiduelle des capteurs. Les travaux suivants considèrent tous des cibles **communicantes** mais dans des contextes différents.

Dans [77], un algorithme distribué, basé sur une architecture en cluster gère le suivi d'une cible se déplaçant à vitesse constante en construisant les clusters de façon dynamique au fur et à mesure du déplacement de la cible. Le capteur qui détecte en premier la cible devient nœud-parent et sélectionne parmi ses voisins les capteurs qui participeront à la localisation en se basant sur les mesures obtenues.

Dans [53], les auteurs traitent le suivi de cible comme un problème d'optimisation et utilisent un algorithme génétique multi-objectifs d'une part pour améliorer la précision des mesures de la cible et d'autre part pour sélectionner les capteurs qui participeront au suivi. Dans [50] le suivi de cible est aussi traité comme un problème d'optimisation mais cette fois les auteurs utilisent l'estimation du maximum de vraisemblance pour le résoudre.

L'étude présentée dans [84] traite le problème de suivi de cible à l'aide d'un capteur sans fil mobile. Dans une zone d'intérêt, un ensemble de capteurs fixes nommés ancres ainsi qu'un capteur mobile émettant des signaux lui permettant de communiquer avec le réseau sont déployés. Une cible communicante se déplaçant dans cette zone émet elle aussi des signaux qui sont récoltés par ce réseau et envoyés au centre de fusion de données, ce dernier se chargera de calculer la position de la cible ainsi que du nœud mobile. Une fois ces données obtenues, il dirigera le nœud mobile afin de suivre la cible.

La solution proposée dans [81] traite le problème de suivi de cible de la manière la plus élémentaire qui soit. En d'autres termes, les capteurs ne produisent comme données de sortie qu'une simple information cible "détectée" ou "non-détectée" sous forme de bit "1" ou "0". Une fois la cible détectée, le capteur concerné identifie la portion de l'arc de son champ de détection circulaire par lequel la cible a pénétré. La position de la cible est ensuite fixée au centre de cet arc.

Le travail proposé dans [58] s'attèle à gérer le problème de suivi de cible dans les réseaux cellulaires. Les auteurs font appel aux méthodes de Monte-Carlo séquentielles ou filtres à particules pour analyser les signaux émis par la cible et en déduire sa position et sa vitesse de déplacement.

Bien que les travaux proposés ci-dessus intègrent l'idée d'une cible communicante, les contextes présentés sont distinctement différents du notre. En effet, pour certains, l'objectif principal est d'améliorer les mesures récoltées par les capteurs et donc la précision de localisation de la cible et négligent les problèmes de relai d'informations entre les nœuds. D'autres travaux utilisent des nœuds mobiles pour relayer ces informations de suivi. Enfin, certaines solutions sont déployées dans des réseaux cellulaires où les contraintes et particulièrement les contraintes énergétiques ne sont pas les mêmes. Dans notre travail, nous proposons une vision plus globale en nous intéressant entre autre à la partie collaboration entre les nœuds, notamment comment les réveiller les uns après les autres pour suivre la cible tout au long de son évolution dans la zone d'intérêt et cela en gérant au mieux le compromis entre la précision du suivi et la consommation énergétique. Les prochains paragraphes s'appliqueront à décrire en détail cette solution.

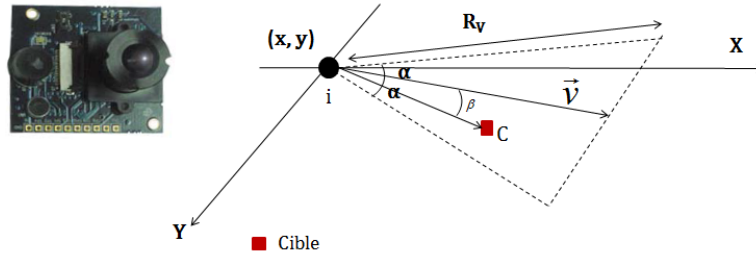


FIGURE 3.2 – Imote2 [2] et le champ de vision d'un capteur caméra.

3.3 Algorithme de suivi de cible communicante-CTC

Dans cette section, nous allons détailler notre contribution. Nous commençons d'abord par décrire le système, ensuite, nous présentons la stratégie de déploiement ainsi que l'algorithme d'association proposé, enfin, nous décrivons l'algorithme de suivi de cible communicante.

3.3.1 Description du système

Une architecture réseau en cluster, hiérarchique et décentralisée est implantée. Chaque cluster se compose d'un nœud-parent (*cluster-head*) et de plusieurs nœuds-fils (*cluster-members*). Les nœuds-fils constituent un ensemble homogène de capteurs multimédia sans fil équipés de caméras : appelons les CCs pour *Capteur Camera*. Chaque CC est doté d'un champ de vision de forme conique avec un angle d'ouverture 2α , une portée de capture R_V ainsi qu'une portée de transmission R_T . Un exemple de CC existant : MEMSIC (anciennement CrossBow) propose l'Imote2 [2] qui intègre une caméra à faible résolution (640x480). La figure 3.2 illustre un Imote2 et son champ de vision. Les CCs étant limités en terme d'énergie, nous avons choisi de déployer des capteurs moins contraints énergiquement jouant le rôle de Nœud-Parents (NP). Ces capteurs ont une portée de transmission, R_{NP_T} , plus importante que celle des CCs et ne disposent pas de caméras s'affranchissant ainsi du traitement de flux multimédia coûteux en ressource.

Dans le but de minimiser l'activité des CCs, les NPs se chargent de la collecte, de la fusion et du routage des données. Tous les CCs transmettent les informations récoltées à leurs NPs respectifs qui se chargent de les traiter et de les transférer au puits (*sink*). Nous supposons que le puits peut se trouver n'importe où dans la zone d'intérêt, une transmission multi-sauts est donc requise. La figure 3.3 illustre une architecture réseau en cluster. Afin d'optimiser les performances de l'architecture en cluster et d'améliorer les résultats de l'algorithme de suivi, une stratégie de déploiement est proposée au préalable. Cette dernière sera décrite dans la prochaine sous-section.

3.3.2 Déploiement du réseau basé sur W-VFA

Comme étape préliminaire, la phase de déploiement a pour but de maximiser les couvertures réseau et vidéo. Nous proposons pour cela une version adaptée à notre contexte de l'algorithme VFA (*Virtual Force Algorithm*) [94]. VFA utilise le concept

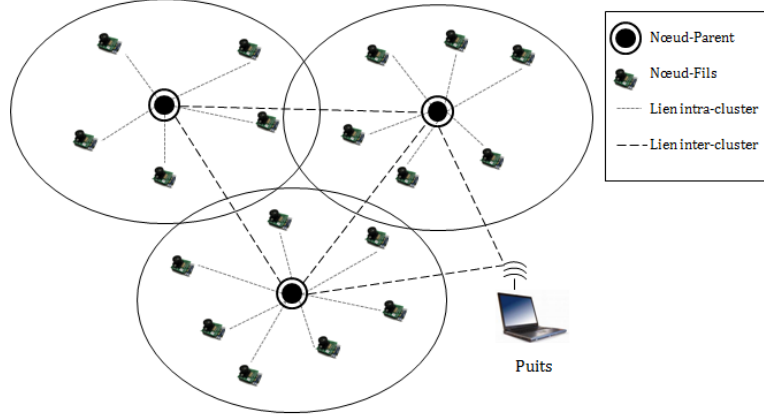


FIGURE 3.3 – Architecture réseau en cluster.

de forces répulsives et attractives afin de déterminer une meilleure position pour les capteurs. Nous supposons que cette phase est exécutée en amont, sur une machine n'ayant pas de contraintes énergétiques (exemple : un ordinateur). Les résultats seront ensuite utilisés pour déployer les capteurs dans la zone d'intérêt.

Nous disposons d'informations préliminaires sur cette zone d'intérêt, nous choisissons donc pour commencer un déploiement initial planifié au lieu d'un déploiement totalement aléatoire. Dans un déploiement planifié, les capteurs sont placés de façon intelligente et régulière en fonction de la topologie de la zone, évitant les obstacles et les obstructions. Une fois que les coordonnées initiales sont obtenues, elles serviront de base pour calculer les nouvelles. C'est à ce niveau que l'algorithme de déploiement intervient. Nous commencerons d'abord par calculer les nouvelles positions des NPs, ensuite celles des CCs.

Comme décrit dans la section précédente, notre réseau se compose de N nœuds-parents ayant pour identifiants $\{NP_1, NP_2, \dots, NP_N\}$. Suite au déploiement initial, chaque NP_i calcule sa force totale \vec{F}_i . \vec{F}_i représente le total des forces attractives et répulsives appliquées sur le NP_i , elle est calculée comme suit :

$$\vec{F}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \vec{F}_{ij} + \vec{F}_{obs} \quad (3.1)$$

\vec{F}_{ij} représente la force exercée entre le NP_i et le NP_j . \vec{F}_{obs} représente la force répulsive totale exercée sur le NP_i par les obstacles. Le calcul de \vec{F}_{ij} à l'aide du système d'équation 3.2 se fait comme suit :

$$\vec{F}_{ij} = \begin{cases} (W_A(d_{ij} - d_{th}, \alpha_{ij})), & \text{if } d_{ij} > d_{th} \\ 0, & \text{if } d_{ij} = d_{th} \\ (W_R \frac{1}{d_{ij}}, \alpha_{ij} + \pi) & \text{if } Otherwise \end{cases} \quad (3.2)$$

W_A et W_R étant respectivement les mesures des forces attractives et répulsives. α_{ij} représente la direction de \vec{F}_i . d_{ij} est la distance Euclidienne entre les centres de gravité de NP_i et NP_j alors que d_{th} est le seuil de distance qui contrôle la proximité ou

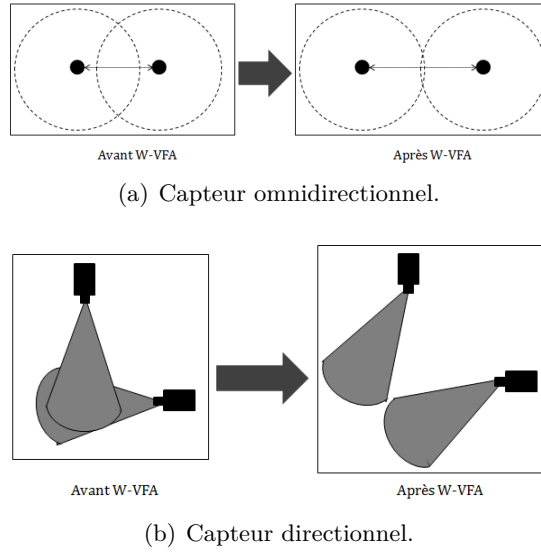


FIGURE 3.4 – Exemple illustratif de déploiement avant/après W-VFA.

l'éloignement des NPs. Sa valeur est déterminée en se basant sur la portée de capture R_{NP_T} . En suivant le même principe de calcul, \vec{F}_{obs} est calculée en se basant cette fois sur la distance entre le NP_i et le centre de gravité de l'obstacle.

Dans ce travail, nous introduisons le concept de sous-zones critiques et nous considérons les forces appliquées par celles-ci. Dans des environnements réels, il existe des sous-zones plus importantes à couvrir que d'autres. Dans un immeuble par exemple, les couloirs, les entrées/sorties et les lieux de forts passages sont plus importants à couvrir que des bureaux. Autre exemple : dans un musée la priorité est donnée aux œuvres d'art. Ces sous-zones sont pondérées en fonction de leur importance. Nous ne nous attarderons pas ici sur la façon de pondérer ces zones. Cette tâche incombe aux professionnels tel que les architectes ou les concepteurs des systèmes de sécurité. Le poids attribué à chaque zone est considéré dans le processus de déploiement, par conséquent, \vec{F}_i est calculé en utilisant l'équation 3.3.

$$\vec{F}_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \vec{F}_{ij} + \vec{F}_{obs} + W_{gt} \vec{F}_{szc} \quad (3.3)$$

\vec{F}_{szc} est le total des forces attractives appliquées par les sous-zones critiques sur le NP_i . Sa valeur est calculée en utilisant l'équation 3.2, la distance utilisée dans ce cas est celle qui sépare le NP_i et le centre de gravité de la sous-zone critique. W_{gt} est le poids assigné à chacune d'elles.

Grâce à cette nouvelle approche, nous améliorons l'algorithme de déploiement initial VFA en W-VFA (*Weighted-VFA*) qui prend désormais en compte les sous-zones critiques et leurs poids.

Après le placement des NPs, nous nous intéressons au déploiement des CCs en gardant le même principe de sous-zones critiques. Nous réutilisons les mêmes équations en tenant compte des contraintes supplémentaires expliquées ci-dessous.

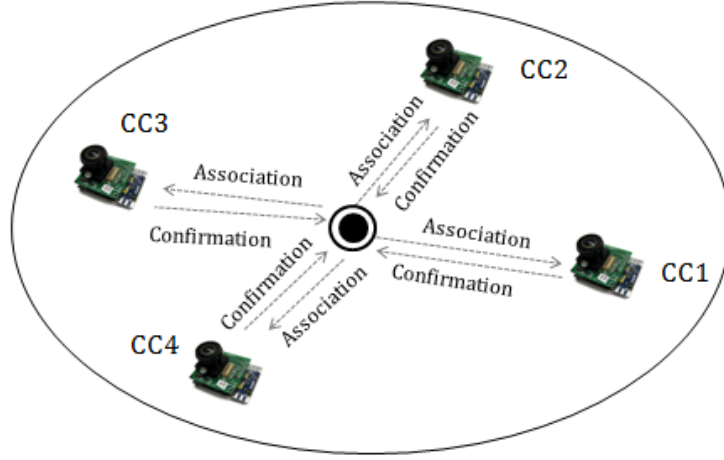


FIGURE 3.5 – Mécanisme d'association.

- Alors que dans le travail initial, les nœuds sont dotés de champs de capture omnidirectionnels (360°), les CCs ont quand à eux des champs limités représentés par des cônes (60°). Par conséquent, \vec{F}_i est appliquée au centre de gravité du champ de vision. Dans ce cas, le mouvement du CC inclut non-seulement un re-positionnement mais en plus une orientation de la caméra. La différence est illustrée dans la figure 3.4.
- La distance entre un CC et NP doit être inférieure à R_T , la portée de transmission du CC, cela permet d'assurer que chaque CC se trouve au moins à la portée d'un NP.

Le réseau est déployé en utilisant les résultats obtenus grâce à W-VFA. Chaque NP connaît sa position et chaque CC connaît sa position et son orientation, ces informations seront utiles durant le processus de suivi.

3.3.3 Algorithme d'association

Une fois les capteurs déployés, la phase d'association peut commencer. L'objectif de cette phase est de s'assurer que chaque Nœud-Fils (NF) se trouve à un seul saut d'un NP. On évite ainsi les interférences et la perte d'énergie causées par les communications multi-sauts.

L'association s'effectue à l'aide d'un mécanisme classique d'échange de messages : requête/confirmation. Chaque NP diffuse une requête d'association contenant son identifiant ainsi que sa position. Si un NF reçoit une seule requête de ce type, cela veut dire qu'il se trouve à la portée d'un seul NP, il accepte donc de s'associer définitivement à lui et lui renvoie un message de **confirmation** scellant ainsi cette association. Le message de **confirmation** contient l'identifiant du NF, sa position et son orientation finale. Ces informations sont obtenues dans la phase finale de l'algorithme de déploiement. La figure 3.5 illustre ce mécanisme d'association. Un cas particulier peut se produire, un NF peut recevoir plusieurs requêtes d'association de la part de NPs différents, dans ce cas celui qui aura le meilleur LQI (*Link Quality indicator*) sera sélectionné.

Dans ce travail, nous avons choisi une stratégie d'association statique plutôt que

dynamique car nous déployons deux types de nœuds à contraintes énergétiques différentes. L'intérêt d'une association dynamique comme LEACH [28] où le NP est sélectionné à chaque tour parmi les membres du cluster en se basant sur l'énergie résiduelle est donc amoindri. Bien que cette méthode ait pour but d'équilibrer la charge entre les différents nœuds, elle reste néanmoins inutile dans notre contexte et engendre un coût énergétique non-négligeable.

3.3.4 CTC

Le processus de suivi dans CTC est divisé en quatre étapes successives : détection, sélection de capteurs, localisation et observation de la cible.

3.3.4.1 Détection

Dans la plupart des applications de suivi, la cible apparaît de façon asynchrone, activer tous les capteurs est donc inutile et coûteux. Dans ce travail, nous supposons que tous les capteurs, après la phase de déploiement, sont en hibernation. Un capteur est en hibernation lorsque son module de captage est inactif, son module de communication reste quant à lui toujours en veille pour des raisons évidentes de collaboration.

Une seule cible communicante à la fois, traverse la zone d'intérêt en empruntant une trajectoire aléatoire. Rappelons qu'une cible communicante est équipée d'un module lui permettant de communiquer avec le réseau, par conséquent, elle peut être localisée à tout moment dans la zone de déploiement. Cette cible envoie périodiquement une trame balise (*Balise*). Le processus de suivi débute lorsqu'un CC se trouvant à la portée de la cible reçoit ce *Balise*. Dans ce cas, il mesure la distance d_i le séparant de la cible grâce à une des techniques d'estimation de l'intensité du signal reçu (RSS : Received-Signal-Strenght)[54] [23]. Il informe ensuite son NP en envoyant un message **Cible-détectée**, ce message contient l'identifiant du CC émetteur, la valeur de d_i et le temps de détection. Cette dernière valeur sera utile dans les cas particuliers où la même cible est détectée par plus d'un cluster.

3.3.4.2 Sélection de capteurs

En se basant sur les informations reçues par le CC via le message **Cible-détectée**, le NP est en charge de l'élection de deux autres CCs, appartenant à son propre cluster qui participeront à la phase de la localisation. En effet, la localisation est réalisée à l'aide d'un mécanisme de trilatération qui nécessite les coordonnées de trois (03) capteurs (ancres). La question est : *comment sélectionner ces capteurs ?*

Pour répondre à cette question, rappelons nous que l'objectif principal de notre algorithme de suivi est la gestion du compromis entre la précision de suivi et l'économie énergétique, la sélection doit donc tenir compte de ces contraintes.

Nous proposons l'utilisation d'une méthode de sélection probabiliste implémentée au niveau des NPs. Le processus de sélection est décrit comme suit : pour chaque CC faisant partie de son cluster, le NP calcule la capacité C_i de suivi en utilisant l'équation 3.4.

$$C_i = \beta P_i + (1 - \beta)T_i \quad (3.4)$$

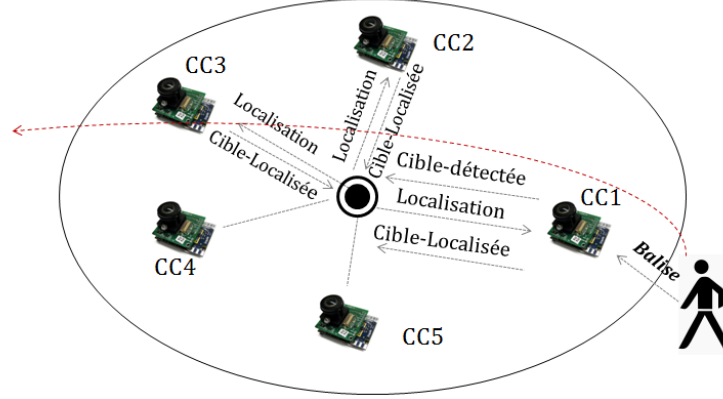


FIGURE 3.6 – Exemple illustratif des échanges de messages entre le NP et les NF d'un même cluster durant les phases de détection et de localisation.

Où P_i et T_i étant respectivement l'énergie résiduelle et la précision de suivi du $i^{\text{ème}}$ CC. β est un paramètre d'équilibrage. Selon sa valeur, la priorité est donnée à une des métriques d'évaluation. La valeur de P_i est incluse dans l'intervalle $[0,1]$ où 1 représente 100% d'énergie résiduelle. Les informations sur l'énergie disponible sont envoyées et mises à jour par les nœuds-fils lorsqu'il y a un changement de cette valeur. La valeur de T_i est aussi incluse dans l'intervalle $[0,1]$ et est obtenue comme décrit ci-dessous :

$$T_i = 1 - (D_i/R_T) \quad (3.5)$$

D_i représente la distance entre le $i^{\text{ème}}$ CC et la position provisoire de la cible estimée par le NP en se basant sur la distance d_i envoyée par le premier CC qui a déjà détecté la cible. R_T est décrit plus haut, il représente la portée de transmission des CCs et donc la distance maximale au delà de laquelle le CC ne pourra pas détecter ou localiser la cible. Si la valeur D_i est supérieure ou égale à R_T , le $i^{\text{ème}}$ CC ne pourra pas localiser la cible, par conséquent, T_i sera égale zero.

Pour finir, la probabilité qu'un nœud soit sélectionné pour participer à la phase de localisation Pr_i est obtenue comme décrit dans l'équation 3.6.

$$Pr_i = 1 - (N_i/N_c) \quad (3.6)$$

N_c représente le nombre de nœuds-fils composant le cluster. N_i représente quant à lui le nombre de nœuds-fils se trouvant dans le même cluster et ayant une capacité C_i supérieure au $i^{\text{ème}}$ CC. Les capteurs ayant les meilleures probabilités sont sélectionnés par le NP qui les informe en envoyant une requête de **Localisation**.

Chacun des CCs sélectionnés calcule la distance d_i qui le sépare de la cible. Puis répond au NP par un message nommé **Cible-localisée** qui contiendra cette distance. Dans le cas où un des CCs se trouve dans l'impossibilité de calculer la distance d_i , le NP répétera le processus jusqu'à ce qu'il sélectionne trois (03) CCs capables de le faire. La figure 3.6 illustre à ce point les messages échangés entre un NP et un NE. Dans l'exemple illustré, CC1 est le premier capteur à détecter la cible, CC2, CC3 ont des probabilités Pr_i supérieures à celles de CC4 et CC5 et sont donc sélectionnés par le NP pour participer à la localisation.

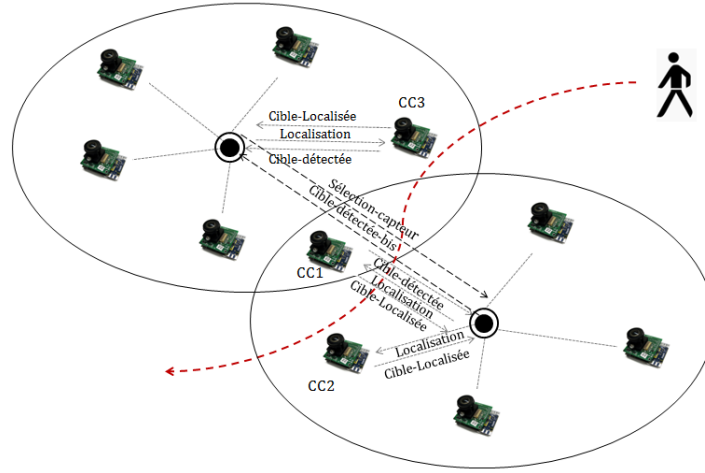


FIGURE 3.7 – Exemple illustratif des échanges de messages dans le cas où la cible est détectée par plus d'un cluster.

Dans le processus de suivi, un cas particulier peut se produire. Une cible peut être simultanément détectée par plus d'un cluster, provoquant ainsi de la redondance de données ainsi que du gaspillage de ressources. Pour remédier à cette situation, nous proposons une collaboration inter-cluster. En effet, alors que dans le cas classique le NP communique uniquement avec les NFs de son propre cluster, dans ce cas particulier, le NP a la possibilité d'échanger des informations avec les autres NPs des clusters voisins afin d'améliorer les performances de l'algorithme.

L'approche à suivre est décrite comme suit : si un NP reçoit un message **Cible-détectée** de la part d'un CC localisé à la frontière de sa zone de communication, il informe le NP le plus proche de cette zone en envoyant une requête nommée **Cible-détectée-bis**. Formellement, un CC se trouve à la frontière de la zone de communication d'un NP si la distance $d(NP, CC)$ entre lui et son NP satisfait la condition suivante :

$$d(NP, CC) > R_{NP_T} - R_V \quad (3.7)$$

Pour rappel, R_{NP_T} est la portée de transmission du NP. L'équation 3.7 assure que les CCs ayant leurs champs de vision au sein de la zone de communication du NP ne sont pas considérés comme nœuds frontières. Le message **Cible-détectée-bis** contient la position du CC frontière, la distance d_i mesurée ainsi que le temps de détection. Lorsque un NP d'un cluster voisin reçoit ce message, il vérifie d'abord si il y a un CC dans son propre cluster qui a détecté la cible au même moment. Si c'est le cas, il poursuit le processus de sélection normalement et renvoie le message **Sélection-capteur** contenant la position des trois CCs sélectionnés dans son cluster. Une fois que le NP initial a reçu ces informations, il sélectionne les trois (03) meilleurs capteurs parmi les capteurs sélectionnés par l'autre NP et ceux qu'il a lui même sélectionnés. Si plus d'un capteur se trouve dans son cluster alors il gèrera lui même la phase de localisation. Dans le cas contraire, il prévient l'autre NP, qui sera en charge de cette phase, en lui envoyant un message **Localisation-bis**. La figure 3.7 illustre un exemple de ce cas particulier. Dans cet exemple, la cible est détectée par des CCs de deux

clusters différents. Le NP du cluster qui contient CC1 et CC2 est celui qui se charge de la phase de localisation étant donné que le nombre de CCs qui ont détectés la cible dans son propre cluster est plus important que dans l'autre cluster.

3.3.4.3 Localisation

Afin d'accomplir cette tâche, le NP utilise un algorithme de trilatération [79], grâce à cette solution les coordonnées de chaque point se trouvant à l'intérieur d'un triangle peuvent être calculées en ayant pour seules données les coordonnées des sommets du triangle. La procédure à suivre est décrite comme suit : on admet que les coordonnées de la cible C sont (x_C, y_C) . Les coordonnées des trois (03) CCs sélectionnés et qui représentent donc les sommets du triangle sont respectivement (x_1, y_1) , (x_2, y_2) et (x_3, y_3) . Les distances entre la cible et ces trois CCs sont respectivement d_1, d_2, d_3 . La position de la cible peut être estimée en résolvant l'ensemble non-linéaire d'équations suivant [29] :

$$(x_T - x_i)^2 + (y_T - y_i)^2 = d_i^2 \quad \text{for } i = 1, 2, 3 \quad (3.8)$$

3.3.4.4 Observation de la cible

Après la phase de localisation, le NP sélectionne la caméra la mieux orientée, afin d'observer la cible. Cette dernière est utilisée afin d'observer, identifier et classifier la cible. Ces données multimédia peuvent être utilisées afin de fournir des services et des applications personnalisés pour des classes spécifiques de cibles. De plus, ces données peuvent s'avérer très utiles dans un contexte de suivi multi-cibles où l'identification des cibles est nécessaire. Pour sélectionner la caméra, Le NP utilise le test *Target in Sector* [59] qui a pour objectif de déterminer si une cible se trouve réellement dans le champ visuel d'un capteur.

Le test est décrit comme suit :

$$\begin{cases} d_{iC} \leq R_v \\ \beta \in [-\alpha, \alpha] \end{cases} \quad (3.9)$$

Où d_{iC} est la distance entre la cible et le capteur ; β est l'angle entre $i\vec{C}$ et \vec{v} ; \vec{v} est le vecteur qui divise en deux le champ visuel de la caméra (figure 3.2). La caméra sélectionnée appartient à un des CCs impliqués dans la procédure de localisation. Chaque NP connaît l'orientation des caméras de ses NFs via le message de **Confirmation** reçu à l'étape d'association.

Une fois sélectionné, le NP prévient le capteur concerné par un message **Activation-caméra**. Ce CC capture l'image de la cible et l'envoie en retour via un message **Donnée-multimédia**. Cette étape optionnelle est exécutée en dehors des périodes de détection et de localisation, uniquement si le CC dispose de l'énergie suffisante. Pour finir, toutes les données récoltées sont transmises au puits par les NPs durant les phases d'inactivité du réseau. Les algorithmes 1 et 2 correspondant aux différentes phases de la solution sont décrit en pseudo-code.

Algorithme 1: Fonctionnement capteur caméra

```

1: switch (case)
2:   case 1 Cible détectée:
3:     Mesure la distance  $d_i$  ;
4:     Envoie le message Cible-détectée au NP ;
5:     Break
6:   case 2 Requête de Localisation par le NP :
7:     Localisation ;
8:     Envoie le message Cible-localisée ;
9:   case 3 Requête d'Activation-caméra par le NP:
10:    Capture des images de la cible ;
11:    Envoie le message Données-multimédia ;
12:    Break
13: end switch

```

Algorithme 2: Fonctionnement nœud-parent

```

1: switch (case)
2:   case 1 Reçoit le message Cible-détectée :
3:     Sélectionne les 3 capteurs caméra les mieux positionnés ;
4:     Envoie le message de Localisation ;
5:     Sélectionne la caméra la mieux orientée ;
6:     Envoie le message Activation-caméra au capteur sélectionné ;
7:     Break
8:   case 2 Reçoit une message Cible-localisée :
9:     Calcule la position de la cible en utilisant la triangulation ;
10:    Envoie les résultats au puits durant les phases d'inactivité du réseau ;
11:    Break
12: end switch

```

3.4 Simulations et évaluation de performances

3.4.1 Contexte et paramètres de simulation

Dans cette section, nous évaluons les performances de la solution proposée. Nous utilisons le simulateur NS-2 [3] pour réaliser cette tâche. Les paramètres de simulation sont résumés dans le Tableau 3.1. Les valeurs de R_T , R_V et α sont sélectionnées en fonction des caractéristiques réelles des Imote2 [2]. En nous basons sur des simulations préalables, la valeur de β utilisée dans l'équation 3.4 est fixée à 0.5 afin d'équilibrer l'impact de la précision du suivi et la consommation énergétique.

Le nombre de NPs est fixé à six (6) quelque soit le nombre de CC déployés. Cette valeur est déterminée en fonction de plusieurs critères. Le premier est le taux de couverture réseau obtenu théoriquement (sans chevauchement) et calculé à l'aide de l'équation 3.10. Pour six (6) NPs le taux de couverture est égale à 137,37%, en effet, étant donné l'importance de la portée de transmission R_{NP_T} (Tableau 3.1) seuls 6 NPs sont nécessaire pour couvrir la totalité de la zone d'intérêt.

$$TauxCouverture(\%) = \frac{NombreNP \times SurfaceNP}{SurfaceZoneIntérêt} \times 100 \quad (3.10)$$

Le deuxième critère est la distance moyenne entre un NP et un CC. En effet, plus la distance entre l'émetteur et le récepteur est grande, plus l'énergie consommée est importante [45]. Les équations 3.11 et 3.12 démontrent la relation entre la consommation énergétique en mode transmission E_{Tx} et la distance d .

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-e}(k, d) + E_{Tx-a}(k, d) \quad (3.11)$$

$$E_{Tx-a}(k, d) = E_e \times k + E_a \times k \times d^2 \quad (3.12)$$

k représente le nombre de bits à transmettre. E_e et E_a sont respectivement l'énergie consommée pour activer la transmission et celle pour amplifier le signal. Enfin, le dernier critère est la répartition de charge entre les NPs. En effet, plus nous déployons de nœuds-parents plus le nombre de CC dont ils sont en charge diminue.

Nous commencerons d'abord par évaluer les performances de la stratégie de déploiement. Nous évaluons ensuite l'algorithme de suivi CTC. Cinq (05) trajectoires aléatoires sont générées et utilisées pour les simulations. Trois (03) métriques sont utilisées pour évaluer les performances de CTC : la précision du suivi, la consommation énergétique et le nombre de messages collaboratifs échangés durant le processus de suivi.

Bien que plusieurs solutions qui considèrent des cibles communicantes existent déjà dans la littérature, notre travail est à notre connaissance un des premiers à considérer ce type de cible dans le contexte des réseaux de capteurs multimédia sans fil. En effet, de telles cibles ont été considérées dans les réseaux de capteurs sans fil classiques [84] [81] ainsi que dans les réseaux cellulaires [58] où les contraintes liées aux couches basses sont différentes. C'est pour cette raison que nous ne pouvons pas comparer notre travail à ceux mentionnés ci-dessus. À la place, nous examinerons les résultats obtenus par CTC avec deux autres solutions dans lesquelles un réseau de capteurs multimédia sans fil est déployé :

1. La solution BASIC, où des capteurs multimédia sont déployés, en permanence à l'état actif, capturant et traitant les images capturées. La localisation est accomplie à l'aide d'une solution basée sur le traitement d'image [60]. Cette solution est choisie comme référence pour illustrer le comportement du réseau lorsqu'aucune stratégie de communication n'est implémentée.
2. OCNS [48], une autre solution basée sur une architecture en cluster qui considère une cible **non-communicante** et décrite dans le chapitre 2. Cet algorithme a pour objectif la sélection des capteurs caméra qui participeront au processus de suivi en se basant sur un modèle probabiliste. Lorsqu'un capteur détecte la présence de la cible, il diffuse l'information. Les capteurs voisins qui reçoivent cette information calculent leur probabilité de détecter la cible. Si elle dépasse un seuil prédéfini, ils activent leurs caméra pour procéder à la localisation. Nous avons choisi cette solution d'une part car une architecture en cluster est aussi utilisée. D'autre part, pour étudier l'impact d'une cible non-communicante sur les performances de suivi et le comparer à celui d'une cible communicante.

TABLE 3.1 – Paramètres de simulation

Couche Phy et Mac	IEEE 802.15.4
Mode d'accès	CSMA/CA non-beaconed
Taille de la zone d'intérêt	200m x 200m
Vitesse de la cible	1.38 m/s (piéton)
Nombre de capteurs Caméra	20, 30, 40, 50
Nombre de nœuds-parents	6
Temps de simulation	200 s
Portée de transmission des capteurs caméra(R_T)	30 m
Portée de capture vidéo (R_V)	20 m
Angle d'ouverture du champ de vision de la caméra(2α)	$\pi/3$
Portée de transmission des nœuds-parents (R_{NP_T})	50 m
Taille des messages	100 bytes
Paramètre d'équilibrage β	0.5

TABLE 3.2 – Paramètres du modèle énergétique (Imote2) [2] [4]

Énergie initiale des capteurs	3 AAA
Mode actif	0.279 Joule/Second
Mode hibernation (Radio on Camera off)	0.226 Joule/Seconde
Mode inactif(Radio off Camera off)	0.015 Joule/Seconde
Mode transmission/ réception (Fréquence 104 MHz)	0.078 Joule/Seconde
Camera on	0.044 Joule/Second

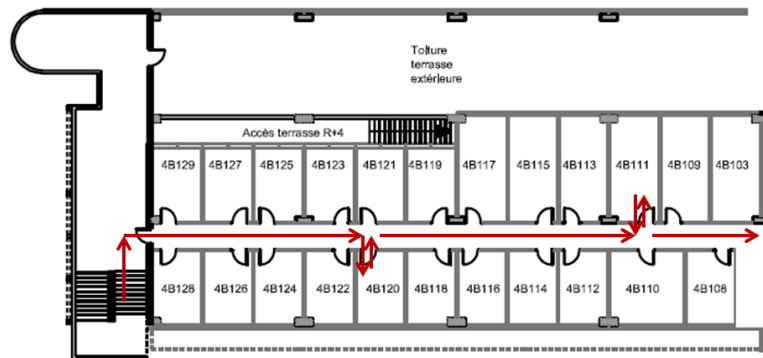


FIGURE 3.8 – Zone d'intérêt (Partie du laboratoire d'informatique de l'université Paris-est MLV).

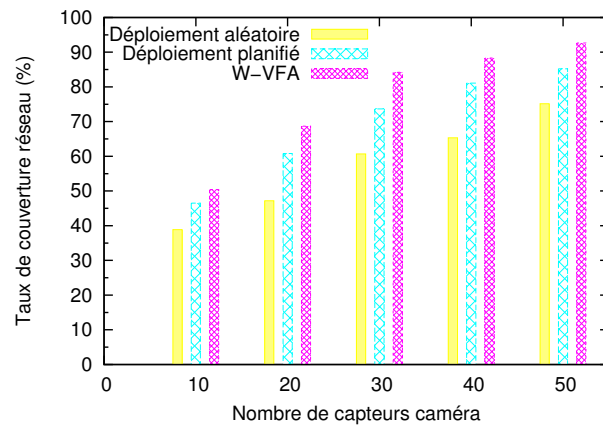


FIGURE 3.9 – Taux de couverture réseau en fonction du capteurs caméra.

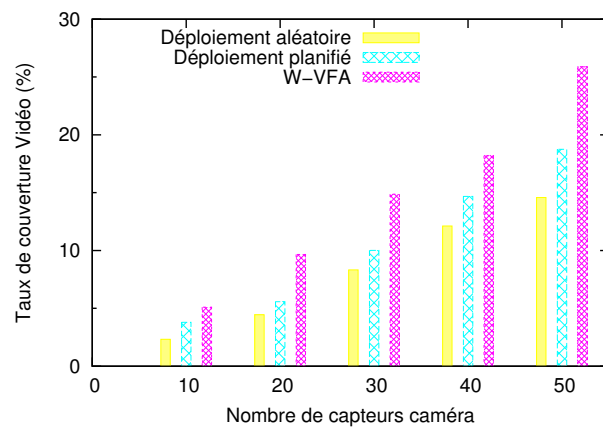


FIGURE 3.10 – Taux de couverture vidéo en fonction du nombre de capteurs caméras (Taille de la zone : 200m x 200m).

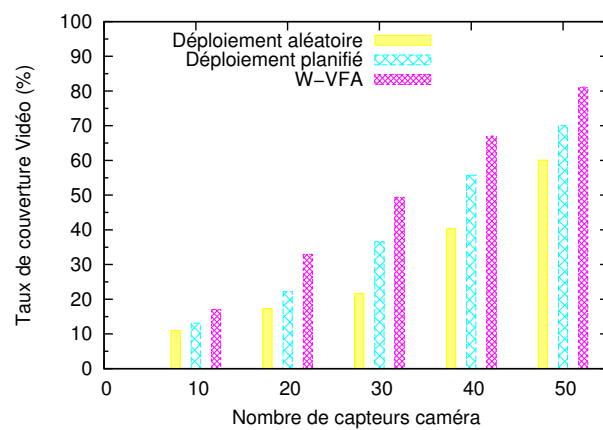


FIGURE 3.11 – Taux de couverture vidéo en fonction du nombre de capteurs caméras (Taille de la zone : 100m x 100m).

3.4.2 Stratégie de déploiement

La stratégie de déploiement est évaluée en calculant les taux de couverture réseau et visuel obtenus. La figure 3.8 illustre la zone de déploiement choisie, elle représente une partie du laboratoire d'informatique de l'université Paris-Est MLV. Le trait rouge représente un exemple de trajectoire de cible.

Nous comparons les performances de W-VFA avec celles d'un déploiement totalement aléatoire et un déploiement planifié en fonction de la topologie de la zone d'intérêt. Pour rappel, pour ce type de déploiement les capteurs sont placés de façon intelligente et régulière suivant la topologie de la zone, évitant les obstacles et les obstructions. Dans un premier temps nous commençons par évaluer le taux de couverture réseau ensuite nous nous intéresserons au taux de couverture visuel.

La figure 3.9 illustre le taux de couverture réseau obtenu en fonction du nombre de capteurs caméra. W-VFA a les meilleures performances. Notre solution obtient jusqu'à 23.53% de couverture réseau en plus comparé au déploiement aléatoire et 10.55% comparé au déploiement planifié. Le taux de couverture réseau des NPs atteint quant à lui les 98.54% (avec chevauchement). Nous expliquons ces résultats par l'efficacité de la stratégie de déploiement proposée, W-VFA permet de diminuer le taux de chevauchement en calculant une meilleure position pour les capteurs dont les champs de transmission se chevauchent. Le déploiement planifié est intuitif et donc moins précis.

La figure 3.10 montre le taux de couverture vidéo obtenu en fonction du nombre de capteurs caméra déployés. Nous observons que W-VFA obtient les meilleurs résultats, cette solution permet d'améliorer la couverture visuelle de 11.3% comparé au déploiement aléatoire et de 7.13% comparé au déploiement planifié. Nous observons aussi que le taux de couverture vidéo de la zone n'atteint que 25.88% pour 50 CCs. Cela peut sembler insuffisant mais pas si on considère le taux de couverture réseau obtenu. Dans un contexte de cible communicante celle-ci s'avère plus important que la couverture vidéo. D'autre part, nous pourrions obtenir de meilleurs résultats en déployant un plus grand nombre de capteurs, mais considérant la taille de la zone d'intérêt, cinquante (50) capteurs au maximum nous semble être un nombre assez réaliste. Pour preuve si nous réduisons la taille de la zone d'intérêt à 100m X 100m pour le même nombre de capteurs, nous obtenons les résultats illustrés dans la figure 3.11. Dans ce cas la couverture visuelle atteint 81.14% pour 50 CCs. Elle est améliorée de presque 12% comparé au déploiement planifié et de 26.71% comparé au déploiement aléatoire. De même que pour la couverture réseau, W-VFA permet d'augmenter la couverture vidéo en calculant une meilleure position pour les capteurs dont les champs visuels se chevauchent et une meilleure orientation pour leurs caméras.

3.4.3 Précision du suivi

La précision du suivi est calculée en fonction du nombre de coordonnées de la cible obtenues sur une trajectoire donnée. En se basant sur la taille de la zone d'intérêt, la vitesse de la cible et le nombre de nœuds déployés, nous avons déterminé que la meilleure précision (notée 100%) est atteinte lorsqu'on obtient une coordonnée chaque cinq (1/5) mètres.

La figure 3.12 illustre les résultats obtenus. Grâce aux caméras qui sont toujours en état actif, la solution BASIC obtient de meilleurs résultats qu'OCNS, nous verrons

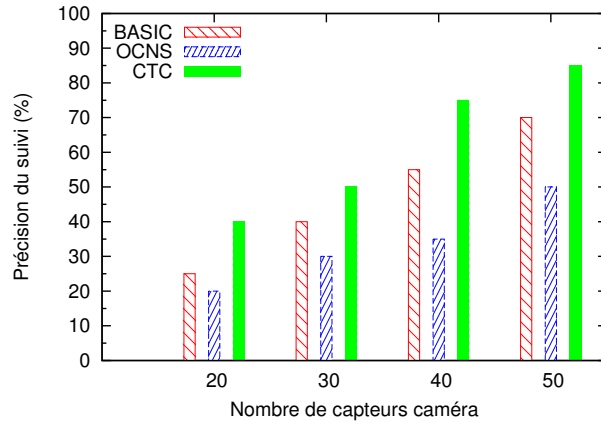


FIGURE 3.12 – Précision du suivi en fonction du nombre de capteurs caméras.

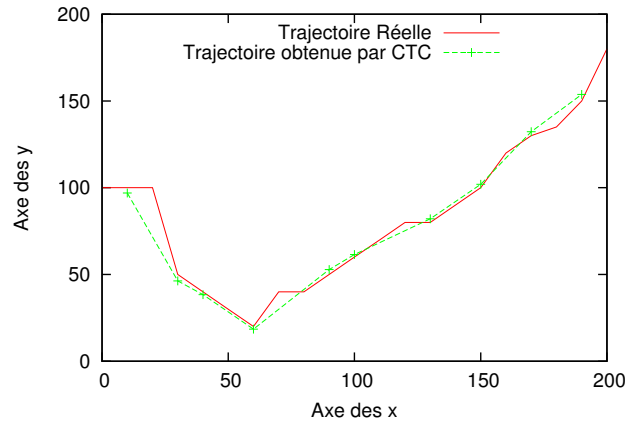


FIGURE 3.13 – Trajectoire réelle vs trajectoire obtenue par CTC.

cependant dans la section suivante qu'elle n'est pas réaliste du fait de sa consommation énergétique importante. Les résultats de CTC surpassent celles des autres solutions, elle apporte jusqu'à 35% de précision en plus comparé à la solution OCNS. Nous expliquons ces résultats d'une part par l'utilisation d'une cible communicante qui collabore avec le réseau et qui facilite donc sa localisation. D'autre part, l'algorithme de déploiement a un impact positif sur les performances de CTC. En effet, alors que dans BASIC et OCNS les capteurs sont déployés de façon aléatoire, dans CTC, ils sont déployés suivant la stratégie de déploiement décrite en section 3.3.2. On en conclut que l'impact de la stratégie de déploiement est plus important que que le nombre de capteurs caméra actifs.

La figure 3.13 illustre et détaille mieux la métrique utilisée, un exemple de trajectoire réelle et de trajectoire obtenue par CTC pour 50 CCs y est illustré. Les points vert représentent les points récupérés par notre algorithme, en les reliant entre eux nous obtenons la trajectoire estimée. Nous observons que les deux trajectoires sont proches l'une de l'autre, en effet, grâce à la trilatération la déviation moyenne ne dépasse pas les 2.72 mètres. Cette figure démontre une fois de plus l'efficacité de CTC.

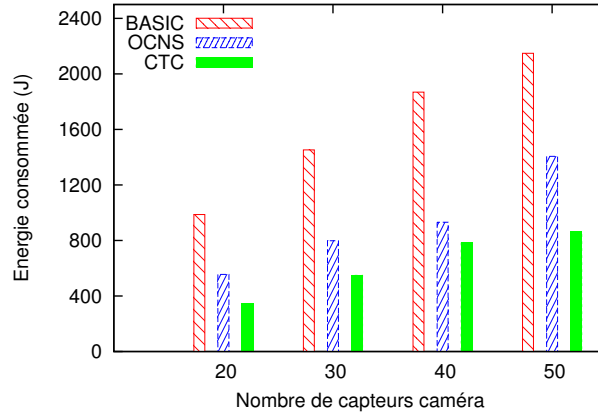


FIGURE 3.14 – Consommation d'énergie en fonction du nombre de capteurs caméras.

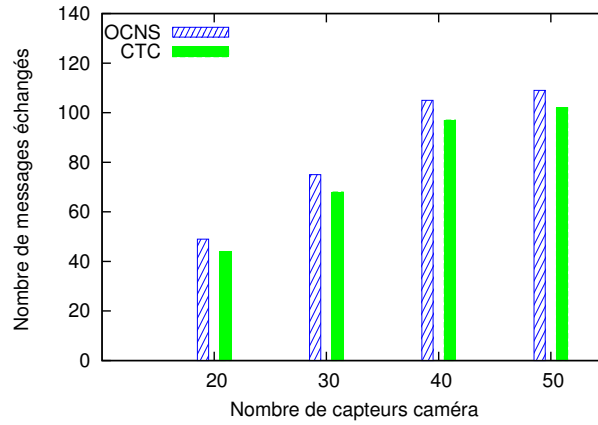


FIGURE 3.15 – Nombre de messages échangés en fonction du nombre de capteurs caméras.

3.4.4 Consommation énergétique

Pour cette métrique nous nous basons sur le modèle énergétique de NS-2 [22] et la consommation réelle des Imote2 [2] [4]. Ces paramètres sont résumés dans le tableau 3.2. Pour évaluer l'énergie consommée durant le processus de suivi, nous comptabilisons le coût énergétique des différentes tâches telles que l'échange de messages, la localisation et l'observation visuelle de la cible. Nous nous concentrons ici uniquement sur la consommation des capteurs multimédia. La figure 3.14 illustre la consommation énergétique moyenne du réseau en fonction du nombre de capteurs caméra déployés. Nous retenons que la solution BASIC est inenvisageable. Les capteurs caméra étant en permanence en état actif, de ce fait le réseau consomme jusqu'à 2148.63 J. CTC obtient de meilleurs résultats qu'OCNS, en effet il permet d'économiser jusqu'à 38.56% d'énergie pour 50 CCs. En effet, en l'absence de cible communicante, OCNS implémente un mécanisme de réveil alterné pour les CCs dans le but de détecter la cible quand celle-ci pénètre la zone de déploiement, ce mécanisme engendre un coût énergétique non-négligeable du en partie à l'échange de messages qu'il entraîne.

3.4.5 Nombre de messages échangés

Le nombre de messages échangés représente la surcharge du réseau où le coût de communication de l'algorithme de suivi. Nous l'obtenons en comptabilisant pour chaque solution le nombre de messages collaboratifs échangés durant le processus de suivi. Nous supposons que la taille des messages est la même quelque soit la solution. En raison de la faible densité de capteurs déployés dans les différents scénarios de simulations, aucune collision ou perte de paquet n'a été enregistrée.

La figure 3.15 illustre le nombre moyen de messages échangés en fonction du nombre de capteurs caméra. Nous ne retrouvons pas la solution BASIC dans cette figure car elle n'est pas basée sur une approche collaborative. Nous observons qu'OCNS a un coût de communication légèrement supérieur à notre solution. Nous l'expliquons par l'échange de messages durant la phase de réveil initiale des CCs. Toutefois, CTC engendre un coût de communication non-négligeable. Alors que dans OCNS seule la communication inter-cluster est possible, dans CTC la communication intra-cluster est aussi utilisée.

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le suivi de cible **communicante** dans le contexte des réseaux de capteurs multimédia sans fil. Le suivi de cible est une application très utile, elle reste néanmoins difficile à implémenter étant donné les contraintes énergétiques liées à ce type de réseaux ainsi qu'aux données qui y transitent.

Nous avons proposé un algorithme implémenté sur un réseau organisé en cluster qui a pour objectif de gérer au mieux le compromis entre la précision du suivi et l'économie de ressources énergétiques. Nous y avons décrit le suivi de cible comme une application à quatre étapes : détection, sélection de capteurs, localisation et enfin, observation visuelle de la cible. Ces étapes sont réparties de manière équitable entre les différents composants du réseau en se basant sur leurs contraintes.

Les performances de la solution proposée étant fortement liées à la façon dont les capteurs sont déployés dans la zone d'intérêt, nous avons aussi amélioré la stratégie de déploiement proposée dans [94] afin de prendre en considération la topologie de la zone d'intérêt. L'étude de performances démontrent l'efficacité du schéma proposé. Il permet d'améliorer la précision de 35% et économise jusqu'à 59.79% d'énergie comparé aux autres solutions.

Bien que l'utilisation d'une cible communicante soit intéressante et facilite son suivi, elle engendre toutefois un trafic réseau non-négligeable due à l'envoi périodique de *balises* particulièrement si on considère des réseaux à forte densité. De plus, dans la vie réelle toutes les cibles ne sont pas toujours collaboratives. En effet, dans certains cas nous nous trouvons face à des cibles malicieuses qui ne veulent ni être détectées ni localisées. C'est pourquoi, dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons au suivi de cible **non-communicante**.

Chapitre 4

Suivi de cible non-communicante dans un environnement hétérogène

Sommaire

4.1	Motivations	56
4.2	Contexte et applications	57
4.3	Algorithme de suivi de cible non-communicante dans un environnement hétérogène-CTA	58
4.4	Simulations et évaluation de performances	67
4.5	Conclusion	73

ALORS que dans le chapitre précédent nous nous sommes intéressés au suivi de cible communicante avec les réseaux de capteurs multimédia sans fil, nous nous intéressons ici au suivi de cible **non-communicante**, plus complexe à détecter. Une cible non-communicante est une cible non-coopérative, dénuée de la capacité de communication radio avec le réseau (exemple : humains, animaux, etc). Ce type de cible est plus conforme à ce qui existe dans la réalité et étend le champ à des applications plus critiques telles que la détection d'intrusion ou la surveillance militaire. La question qui se pose est donc : *comment détecter la présence de la cible si celle-ci ne se manifeste pas ?*

Pour répondre à cette question, nous proposons le déploiement d'un réseau de capteurs hétérogènes composé de capteurs de mouvement et de capteurs multimédia. Les capteurs de mouvement sont des capteurs scalaires généralement de type infrarouge ou ultrason consommant peu d'énergie et permettant de détecter efficacement la présence d'une cible. Ces capteurs se chargent donc de la phase de détection. Les capteurs multimédia sont quant à eux équipés de caméras et se chargent de la phase de localisation. Dans ce chapitre, nous proposons CTA (*Collaborative Tracking Algorithm*), un algorithme de suivi de cible distribué basé sur la collaboration entre les deux types de capteurs composant le réseau. Comme pour CTC, l'algorithme de suivi pour cible *communicante* proposé dans le chapitre précédent, CTA a pour principal objectif la gestion du compromis entre la précision du suivi et la consommation d'énergie. Le suivi

de cible y est défini de façon plus standard comme un processus à deux phases : détection et localisation. Ce processus démarre lorsque la cible est détectée par un capteur de mouvement, l'information est communiquée aux capteurs multimédia voisins qui décident d'activer ou non leurs caméras en se basant sur des critères déterministes ou probabilistes qui prennent en compte la position et/ou l'orientation des caméras. Une stratégie de déploiement préalable pour chaque type de capteur est aussi proposée.

Pour résumer, nos contributions dans ce chapitre sont :

- une stratégie de déploiement pour chaque type de capteur ;
- un mécanisme de suivi de cible non-communicante.

Ce chapitre est structuré comme suit. Après avoir expliqué nos principales motivations dans la section 4.1, nous détaillons notre contexte. Les caractéristiques du réseau hétérogène déployé ainsi que le fonctionnement de l'algorithme de suivi de cible sont décrits en section 4.3. Nous développons l'évaluation de CTA en section 4.4. Nous y montrons aussi les performances et discutons les résultats. Pour finir, la section 4.5 conclut le chapitre.

4.1 Motivations

Un réseau de capteurs sans fil hétérogènes est un réseau dans lequel les capteurs disposent de caractéristiques logicielles et/ou matérielles différentes. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur ce type de réseau dans le cadre du suivi de cible **non-communicante** et les contraintes liées à cette application.

Le réseau hétérogène est utilisé dans notre solution pour pallier aux contraintes énergétiques liées aux traitements et à la transmission des données multimédia. L'idée étant d'exploiter au mieux les caractéristiques de chaque type de capteur afin d'atteindre notre objectif. Nous partons du fait que les capteurs scalaires consomment moins d'énergie que les capteurs multimédia pour bâtir notre modèle. L'hétérogénéité dans les réseaux de capteurs a été étudiée sous différentes formes : hétérogénéité dans la portée de communication, dans les capacités énergétiques, dans la puissance de calcul ou encore le type de données capturées. Dans ce travail nous envisageons l'hétérogénéité sous la dernière forme, c'est à dire en terme de type de données capturées.

Les avantages liés à l'utilisation des réseaux hétérogènes ont été démontrés par le passé dans de nombreux travaux [55] [70]. À titre d'exemple dans [87], il a été démontré que l'hétérogénéité en terme de portée de communication et de capacités énergétiques permet non seulement d'augmenter le taux de délivrance des paquets mais aussi la durée de vie du réseau. Néanmoins, la mise en place de ce type de réseau est quelque peu contraignante, le fonctionnement de ceux-ci étant lié à l'interopérabilité des différents éléments.

Dans notre solution l'hétérogénéité étant définie en terme de disparité des données, elle ne représente pas un problème en soit car le traitement des informations est effectué en local au niveau de chaque capteur. La difficulté réelle réside dans la partie collaboration des capteurs. Ces derniers doivent pouvoir s'échanger des informations indispensables au bon déroulement du processus de suivi. Pour satisfaire ce besoin de communication, nous supposons qu'ils sont équipés de modules de communication identiques leur permettant d'interagir.

4.2 Contexte et applications

4.2.1 Algorithmes de suivi réactifs

Comme nous l'avons expliqué dans les chapitres précédents, les travaux sur le suivi de cible peuvent être classifiés en deux principales catégories : réactives et proactives. Ce travail, de même que le précédent, s'intéresse aux solutions réactives sauf que nous nous concentrons cette fois sur les solutions impliquant une cible non-communicante. Nous allons donc commencer par présenter quelques solutions réactives impliquant des cibles non-communicantes, ensuite nous parlerons des solutions de suivi pour le même type de cible mais utilisant des réseaux hétérogènes.

Dans [33], les auteurs présentent une solution pour le suivi de cible non-communicante dans un réseau de capteurs sans fil. Les capteurs ne pouvant pas rester actif en permanence, un réveil cyclique est implémenté. Une fois la cible détectée, une méthode probabiliste basée sur le modèle de mobilité de celle-ci est proposée afin de sélectionner les capteurs à réveiller.

Les auteurs de [74] ont quant à eux opté pour une architecture hiérarchique qui vise à optimiser la communication entre les composants du réseau. Dans la solution proposée nommée OCO (*Optimized Communication and Organisation*), le processus de suivi est décomposé en quatre phases : collecte d'informations, traitement, suivi et maintenance. Lors de la première phase les positions de tous les capteurs déployés sont récupérées et centralisées au niveau du nœud racine. Dans la seconde, les données redondantes sont éliminées et les routes vers les nœuds feuilles sont établies. Le suivi est réalisé dans la troisième phase en détectant les objets pénétrant dans la zone d'intérêt et en relayant l'information de nœud en nœud sous la supervision du nœud racine. La dernière phase s'exécute uniquement lorsqu'un nœud tombe en panne, dans ce cas une re-configuration du réseau est nécessaire.

Les solutions présentées ci-dessus impliquent l'utilisation de mécanismes de réveil (exemple : réveil cyclique) pour la phase de détection. Le risque est que la cible pénètre la zone d'intérêt sans être immédiatement détectée par un capteur. Pour certaines applications de suivi critique, ce risque ne peut être assumé.

SensEye [38] est à notre connaissance la première solution de suivi de cible introduisant le concept d'hétérogénéité dans les réseaux de capteurs sans fil. Dans le réseau déployé, l'hétérogénéité réside dans les différents types de capteurs multimédia déployés. Les auteurs proposent un réseau de capteurs caméras sans fil à trois niveaux. Chaque niveau est en charge d'une tâche spécifique : le premier niveau gère la partie détection et localisation de la cible, le deuxième gère l'identification de celle-ci, enfin, le troisième gère le suivi en tant que tel, en fusionnant les données. Bien que l'approche proposée soit très intéressante, SensEye ne peut être utilisé que dans des environnements *indoor* où l'énergie n'est pas une contrainte. En effet, un des tiers composant le réseau doit être connecté à une source énergétique en permanence. Cette contrainte limite considérablement le champ applicatif de cette solution.

Dans ce chapitre nous nous intéressons au suivi de cible **non-communicante** dans un environnement hétérogène. L'hétérogénéité consiste en l'utilisation de différents types de capteurs sans fil ; des capteurs scalaires pour la partie détection et des capteurs multimédia pour la partie localisation. La solution proposée est détaillée dans la prochaine section.

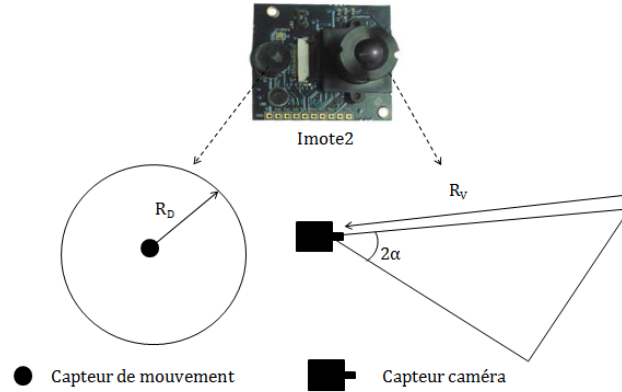


FIGURE 4.1 – Champ de détection d’un capteur de mouvement et champ de vision du capteur multimédia.

4.3 Algorithme de suivi de cible non-communicante dans un environnement hétérogène-CTA

Dans cette section, nous allons décrire plus en détail le réseau déployé. Nous nous attarderons ensuite sur la stratégie de déploiement proposée. Enfin, nous présenterons CTA notre algorithme de suivi.

4.3.1 Description du système

Nous déployons un réseau de capteurs hétérogènes composé de capteurs de mouvement et de capteurs multimédia. Les capteurs de mouvement, qu’on appellera *CM* sont des capteurs scalaires équipés de détecteurs de mouvement infrarouge. Chacun dispose d’un champ de détection de forme circulaire d’une portée R_D . Les capteurs caméra qu’on nommera *CC* sont quant à eux des capteurs multimédia équipés de caméra vidéo. Chacun dispose d’un champ visuel de forme conique d’une portée R_V et d’un angle d’ouverture 2α . À titre d’exemple l’imote2 [2] peut intégrer à la fois un capteur PIR (*Passive infrared Sensor*) et une caméra à faible résolution (640x480). La figure 4.1 illustre cet exemple avec le champ de détection d’un CM et le champ visuel d’un CC. Chaque capteur peut communiquer avec un autre, indépendamment de son type, à condition qu’il se trouve à sa portée de transmission R_T . Nous supposons que chaque CM connaît sa position et que chaque CC connaît sa position et son orientation en utilisant une des méthodes de géo-localisation existantes dans la littérature [27]. Tous les CCs sont initialement en hibernation et tous les CMs sont actifs pour surveiller la zone d’intérêt. Une seule cible non-communicante à la fois traverse la zone d’intérêt en empruntant une trajectoire aléatoire.

4.3.2 Stratégie de déploiement

L’hétérogénéité nécessite un placement optimisé des capteurs afin d’exploiter au mieux les caractéristiques et les ressources de chaque type de capteur. Nous avons par ailleurs démontré dans le chapitre précédent, l’utilité d’une stratégie de déploiement

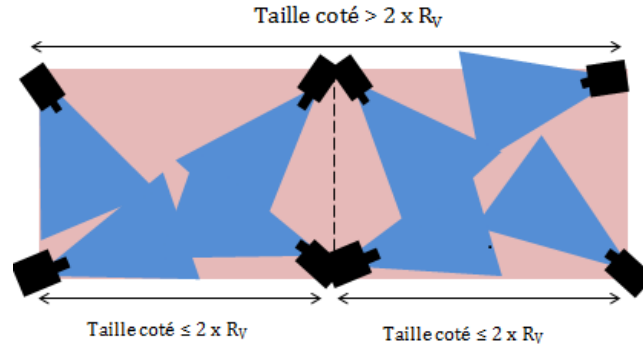


FIGURE 4.2 – Exemple illustratif du découpage de sous-zone critique.

dans notre contexte général de suivi de cible. Cette stratégie, W-VFA, reste néanmoins inadaptée aux réseaux hétérogènes car elle a pour principal objectif de maximiser la couverture étant donné un **nombre de capteurs connus**.

Dans ce travail, le contexte étant différent, les objectifs de la stratégie de déploiement doivent le prendre en considération. En effet, la cible n'étant pas communicante il faut couvrir au maximum la zone d'intérêt avec les capteurs de mouvement afin d'assurer sa détection. Il faut donc déployer le nombre de CMs permettant d'assurer cet objectif tout en évitant les chevauchements, la redondances de données et par conséquent la perte inutile de ressources. Pour les capteurs multimédia, l'objectif est de couvrir en priorité les zones à fort intérêt, la couverture visuelle n'étant pas requise dans 100% de la zone d'intérêt. Nous proposons donc une stratégie de déploiement pour chaque type de nœud où le principe de sous-zones critiques reste présent. Le processus de suivi étant conditionné par la collaboration entre les deux types de capteurs, il faut aussi prendre en considération la distance entre ceux-ci.

4.3.2.1 Déploiement initial

Dans un premier temps, nous nous intéressons au placement des CMs, nous proposons pour cela le découpage de la zone d'intérêt en cellules. La taille de chaque coté d'une cellule correspond au diamètre de la portée de détection $2 \times R_D$. Les CMs sont ensuite placés au centre de chaque cellule afin d'éviter les chevauchements et donc la redondance de données. Leur nombre dépend donc du nombre de cellules.

Pour ce qui suit, nous reprenons le concept de sous-zones critiques expliqué dans le chapitre précédent. Pour rappel, ce concept s'inspire des environnements réels où certaines sous-zones sont plus importantes à couvrir que d'autres. Le nombre de CCs à déployer dépend donc du nombre de celles-ci. Nous supposons que ces sous-zones ont une forme rectangulaire. En effet, les locaux, les bureaux, les corridors sont généralement de cette forme. En raison du coût des capteurs multimédia, nous ne pouvons pas en déployer assez pour couvrir toute la zone d'intérêt. L'idée donc est de privilégier les zones à plus grande importance et d'en déployer assez pour les couvrir.

Dans ce travail, nous partons donc de l'hypothèse que les sous-zones critiques sont plus importantes à couvrir que le reste de la zone, c'est pourquoi nous plaçons les CCs avec une orientation aléatoire à chaque coin de ces sous-zones. En effet, le champ de

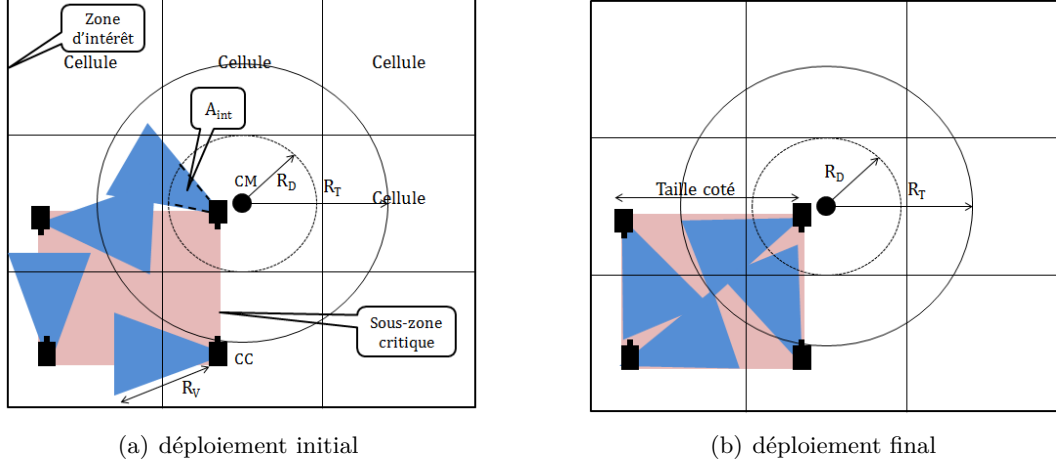


FIGURE 4.3 – Exemple illustratif de la stratégie de déploiement

vision des CCs étant en forme de cône, les coins offrent les meilleures perspectives. Le taux de couverture de ces sous-zones critiques dépend de la taille du champ visuel des caméras, nous supposons donc que la taille des cotés (figure 4.2) de chaque sous-zone satisfait la condition suivante :

$$TailleCoté \leq 2 \times R_V \quad (4.1)$$

Pour que le modèle présenté soit efficace il faut que cette condition soit réalisée. Si la taille d'une des sous-zones ne satisfait pas ce critère, nous la diviserons en taille égale jusqu'à satisfaire ce critère. La figure 4.2 illustre un exemple de découpage de sous-zone critique, dans cet exemple la taille des cotés ne réalise pas la condition de l'équation 4.1, nous la découpons donc en deux parties pour satisfaire le critère requis. Dans le cas illustré nous considérons que nous avons deux sous-zones critiques et nous déployons donc deux fois plus de CCs. Un exemple illustratif du déploiement initial est montré dans la figure 4.3(a).

4.3.2.2 Orientation des caméras

Afin de calculer l'angle d'orientation le plus avantageux pour la caméra de chaque CC, nous proposons un mécanisme distribué à deux phases décrit ci-dessous.

4.3.2.2.1 Phase de collecte d'informations Dans cette première phase chaque capteur collecte des informations sur son milieu environnant, il établit la liste de ses voisins ainsi que la liste des sous-zones critiques se trouvant à sa portée avant de passer à la phase suivante.

Liste des nœuds voisins Dans le but de construire la liste des voisins, chaque capteur diffuse un message **Hello** contenant son identifiant et ses coordonnées. Nous considérons que deux CCs sont voisins si la distance entre eux est inférieure à $2 \times R_V$. En effet, capteur voisin ici ne veut pas dire capteur avec lequel le CC peut communiquer

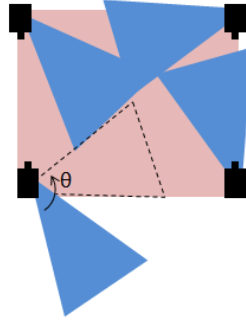


FIGURE 4.4 – Exemple illustratif de l'angle de déviation θ .

(distance $< 2 \times R_T$) mais plutôt capteur avec lequel il est possible d'avoir une zone de chevauchement visuel. Chaque CC qui reçoit ce message, ajoute les informations correspondantes à sa liste.

Liste des sous-zones critiques Les informations sur les sous-zones critiques sont obtenues via une cartographie de l'environnement. Pour construire cette liste, chaque CC calcule la distance qui le sépare de ces sous-zones. Plus concrètement, il faut que la distance entre le capteur et un des sommets de la sous-zone soit inférieur à R_V .

4.3.2.2.2 Phase de décision L'objectif de cette phase est de calculer l'angle d'orientation de la caméra qui :

- maximise la couverture des sous-zones critiques ;
- minimise le taux de chevauchement.

Afin d'atteindre cet objectif, chaque CC exploite les informations récoltées durant la phase précédente. Autour d'un axe de 360° , il procède à des calculs à la recherche d'un angle libre. Nous définissons un angle libre comme un angle où le CC couvre une partie de la sous-zone critique sans chevauchement. Il utilise la position des autres CCs pour déterminer les zones de chevauchement possibles. En effet, il mesure la taille de la zone de chevauchement en utilisant les points d'intersection des périmètres visuels des capteurs. Si un tel angle est disponible le CC calcule l'angle de déviation θ correspondant et diffuse un message **Direction-finale**. Ce message contient l'identifiant du CC, sa position et son angle d'orientation final. La figure 4.4 illustre un exemple de cet angle de déviation.

À la réception du message **Direction-finale** chaque CC met à jour les informations dont il dispose. Ces informations sont utilisées d'une part pour calculer son propre angle d'orientation θ et d'autre part pour résoudre les cas de litige qui peuvent survenir entre les capteurs lorsque l'angle d'orientation le plus avantageux de chacun provoque un chevauchement. Dans ce cas particulier, chaque capteur calcule l'angle θ qui minimise ce chevauchement. Plus les deux capteurs sont proches l'un de l'autre plus le taux de chevauchement est important. Le poids attribué aux sous-zones critiques est quant à lui utilisé lorsqu'un CC peut couvrir plus d'une sous-zone. La sous-zone avec le poids le plus élevé est donc prioritaire.

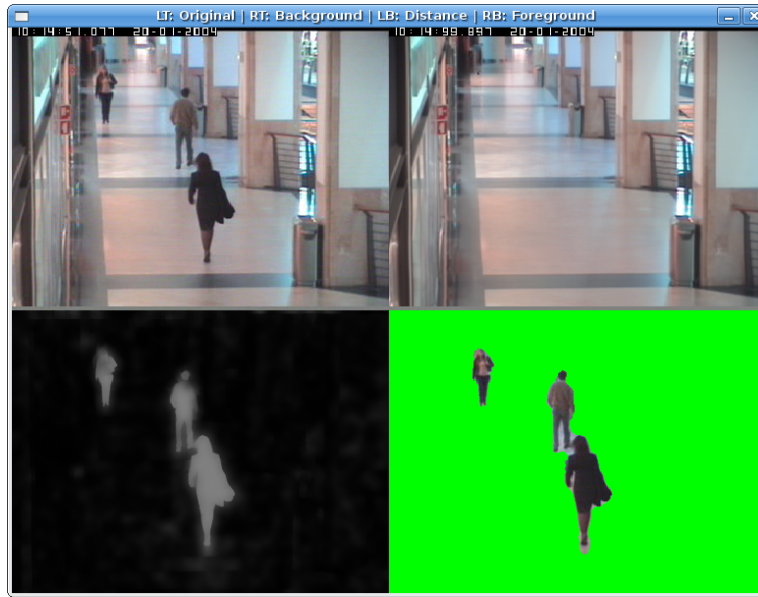


FIGURE 4.5 – *Background subtraction* [10].

Les informations obtenues sont utilisées pour redéployer les capteurs dans la zone d'intérêt. Pour les applications *indoor* non-critiques où l'accès physique aux capteurs est possible, nous pouvons supposer que cette étape est réalisée en amont sur un appareil non-constraint en terme d'énergie afin d'économiser les ressources des capteurs.

4.3.3 CTA

Suite à la phase de déploiement, la phase de suivi peut débuter. Dans CTA, le suivi de cible est décrit comme un processus à deux phases : détection et localisation. Deux schémas différents sont présentés, le premier CTA-déterministe basé sur un réveil des caméra déterministe et le deuxième CTA-probabiliste basé sur un réveil probabiliste.

4.3.3.1 CTA-déterministe

4.3.3.1.1 Détection Le processus de suivi débute lorsqu'un capteur de mouvement détecte la cible. Une cible peut être détectée par un capteur de mouvement lorsqu'elle se trouve dans son champ de détection. Dans ce cas, le CM diffuse un message de **Détection** à tous les capteurs voisins, quel que soit leur type. Ce message contient l'identifiant de l'émetteur ainsi que ses coordonnées. Lorsqu'un CC reçoit M messages de *Détection*, il active sa caméra pour capturer des images de son champ de vision. La valeur de M est fixée selon la précision qu'on veut obtenir. À l'aide des images capturées, le CC vérifie si la cible se trouve réellement dans son champ visuel à l'aide de la méthode nommée *Background subtraction* [10]. Cette méthode consiste à superposer l'image initiale de l'environnement capturée durant la phase de déploiement et l'image actuelle. Ensuite, la présence ou non de la cible est déduite grâce à un système de filtrage. Un exemple présenté dans [1] est illustré dans la figure 4.5.

Dans cet exemple, l'image initiale (en haut à droite) est comparée à celle capturée

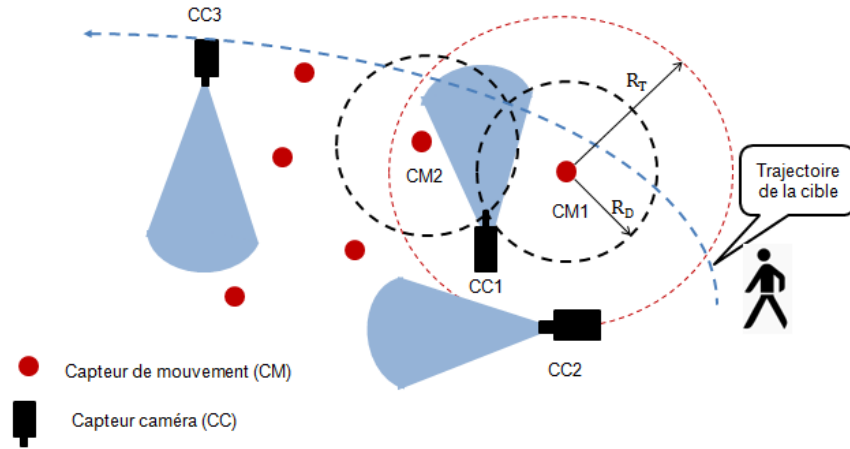


FIGURE 4.6 – Exemple illustratif du fonctionnement de CTA.

durant le processus de suivi (en haut à gauche), le résultat du filtrage est illustré en bas de la figure. Si la cible est réellement dans le champ visuel du CC réveillé alors il procédera à la localisation.

La figure 4.6 illustre un exemple du fonctionnement de CTA-déterministe. Le capteur CM1 est le premier à détecter la présence de la cible dans la zone d'intérêt, il diffuse un message de **Détection** que CC1 reçoit. CM2 est le deuxième à détecter cible, il diffuse aussi un message de **Détection**. Dans cet exemple la valeur de M est fixée à 2, donc le CC1 active sa caméra à la réception du message provenant de CM2. Dans ce cas précis la cible se trouve dans le champ de vision du CC1, il procédera alors à la localisation et enverra les résultats au CM1.

4.3.3.1.2 Localisation La localisation est effectuée en utilisant une technique de traitement d'image. L'idée de base de la solution proposée dans [60] est décrite comme suit : disposant des caractéristiques des images capturées ainsi que la position du capteur, il s'agit de calculer d'abord la taille de l'objet dans l'image et ensuite de calculer la position relative de la cible en se basant sur la taille de l'image et la position du capteur. Cette technique est décrite plus en détail dans le chapitre suivant.

Les coordonnées de la cible ainsi que l'identifiant du CC émetteur sont ensuite renvoyées au premier CM qui l'a contacté via un message de **localisation**. La caméra est finalement désactivée. À la réception d'un message de **localisation**, le CM extrait les informations relatives à la cible puis les transfère au puits qui se chargera de reconstituer la trajectoire de la cible. Si le CM ne reçoit pas de messages **localisation** au bout d'une période T correspondant à la durée de vie d'un message de **Détection**, il agira comme centre de fusion et gèrera la localisation en calculant les **coordonnées approximatives** de la cible. La valeur de T dépend de la vitesse de la cible. Ce mécanisme de secours permet d'obtenir la position (approximative) de la cible à tout moment lorsqu'aucun des capteurs caméra déployés est dans la possibilité de l'observer.

Les coordonnées approximatives (X_A, Y_A) sont obtenues suivant la méthode :

$$\begin{cases} X_A = P_{CM} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{CM}} X_{CM}}{N_{CM}} \right) \\ Y_A = P_{CM} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{CM}} Y_{CM}}{N_{CM}} \right) \end{cases} \quad (4.2)$$

Où P_{CM} représente la probabilité qu'une cible soit détectée par un CM. (X_{CM}, Y_{CM}) sont les coordonnées du CM. N_{CM} est le nombre total de CMs qui détecte la cible au même moment et qui peuvent communiquer les uns avec les autres. Comme décrit dans [95], la valeur de P_{CM} est étroitement liée à la distance d entre la cible et le CM, elle est donc calculée comme suit :

$$P_{CM} = \begin{cases} 1 & \text{si } d \leq R_D \\ e^{-\beta d} & \text{si } d > R_D \end{cases} \quad (4.3)$$

β est un paramètre lié aux caractéristiques physiques des CMs, plus précisément, il détermine la qualité de la détection, plus la cible est proche plus cette qualité augmente. P_{CM} décroît exponentiellement lorsque d accroit.

4.3.3.2 CTA-probabiliste

Dans le deuxième schéma proposé : CTA-probabiliste, la condition d'activation des capteurs caméra s'appuie cette fois sur un modèle probabiliste prenant en considération l'angle d'orientation de la caméra. La partie localisation est quant à elle commune aux deux schémas.

4.3.3.2.1 Détection Le processus d'activation est décrit comme suit : à la réception du premier message de **Détection**, chaque CC vérifie si il existe un chevauchement entre son champ visuel et le champ de détection du CM concerné en utilisant leurs positions respectives, si c'est le cas alors il calcule P_{CC} , la probabilité qu'il détecte la cible. Cette probabilité dépend de (03) trois paramètres :

1. le nombre de CMs se trouvant à la portée de transmission du CC et qui ont détecté la cible ;
2. la distance entre ces CMs et le CC ;
3. l'orientation de la caméra du CC.

P_{CC} est obtenue en utilisant l'équation 4.4 où N_{CM} est le nombre de capteurs de mouvement voisins ayant détectés la cible.

$$P_{CC} = 1 - \prod_{i=1}^{N_{CM}} (1 - P_{CC_i}) \quad (4.4)$$

Preuve :

$$\begin{aligned}
 P_{CC} &= \overline{\overline{P_{CC_1} + P_{CC_2} + P_{CC_3} + \dots + P_{CC_{N_{CM}}}}} \\
 &= \overline{\overline{P_{CC_1} \times P_{CC_2} \times P_{CC_3} \times \dots \times P_{CC_{N_{CM}}}}} \\
 &= 1 - (\overline{P_{CC_1} \times P_{CC_2} \times P_{CC_3} \times \dots \times P_{CC_{N_{CM}}}}) \\
 &= 1 - \prod_{i=1}^{N_{CM}} (1 - P_{CC_i})
 \end{aligned}$$

P_{CC_i} est la probabilité que le CC_i détecte la cible en fonction d'un seul CM, elle est calculée à l'aide de l'équation 4.5 comme suit :

$$P_{CC_i} = \frac{A_{int}}{T_{CD}} \quad (4.5)$$

A_{int} représente la taille de la zone d'intersection entre le champ visuel d'un CC et le champ de détection d'un CM illustré dans la figure 4.3(a). T_{CD} est la taille du champ de détection d'un CM. Si la valeur de P_{CC} obtenue dépasse un seuil prédéfini, la caméra du CC concerné est activée afin de capturer des images.

Pour résumer, les figures 4.7, 4.8 et 4.9 représentent les traitements et les échanges effectués au niveau de chaque type de capteur (CM et CC) pour les deux schémas CTA-déterministe et CTA-probabiliste.

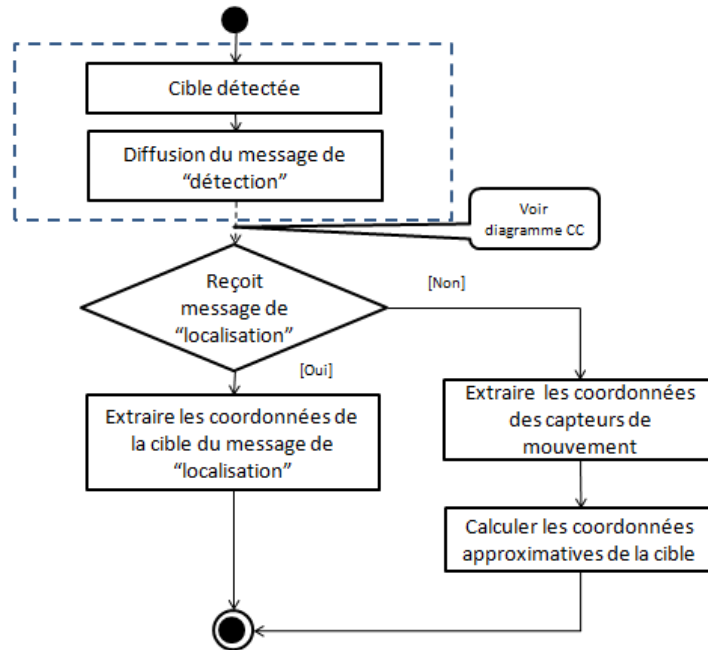


FIGURE 4.7 – Organigramme représentant les traitements au niveau du CM.

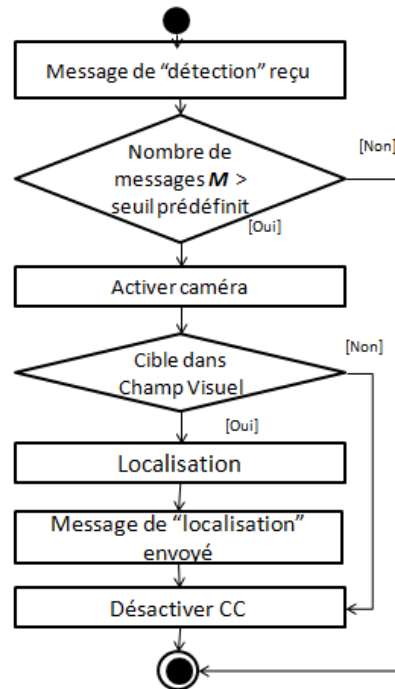


FIGURE 4.8 – Organigramme représentant les traitements au niveau du CC pour CTA-déterministe.

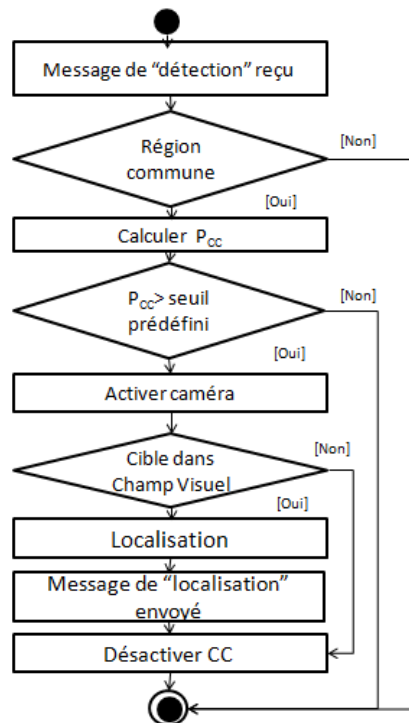


FIGURE 4.9 – Organigramme représentant les traitements au niveau du CC pour CTA-probabiliste.

TABLE 4.1 – Paramètres de simulation

Couche Phy et Mac	IEEE 802.15.4
Mode d'accès	CSMA/CA non-beaconed
Taille de la zone d'intérêt	100m x 100m
Vitesse de la cible	1.38 m/s (piéton)
Temps de simulation	150 s
Portée de transmission des capteurs (R_T)	30 m
Portée de capture vidéo (R_V)	20 m
Angle d'ouverture du champ de vision de la caméra(2α)	$\pi/3$
Portée de détection des capteurs de mouvement (R_D)	15 m
Taille des messages	100 bytes
Durée de vie du message de Détection T	20s
Seuil d'activation P_{CC}	0.8

4.4 Simulations et évaluation de performances

Dans cette section, nous évaluons les performances de la solution proposée. Nous utilisons pour cela le simulateur NS-2 [3]. Les paramètres de simulation sont résumés dans le Tableau 4.1. Les valeurs de R_T , R_V et α sont sélectionnées en fonction des caractéristiques réelles des imote2 [2]. La première partie de cette section est dédiée à l'évaluation de la stratégie de déploiement. Le reste est quant à lui dédié à l'évaluation des deux schémas de CTA.

4.4.1 Évaluation de la stratégie de déploiement

Deux scénarios sont choisis pour l'évaluation de la stratégie de déploiement ; dans le premier, nous avons trois (03) sous-zones critiques dans la zone d'intérêt alors que dans le second nous en avons cinq (05). La taille est le nombre de ces sous-zones est choisi en fonction de la taille de la zone d'intérêt. Le taux de couverture vidéo des sous-zones critiques ($TC - S$) étant une mesure clé, elle est calculée de la manière suivante :

$$TC - S = \frac{N_{CC} \times TV}{N_S \times TS} - TC$$

TV représente la taille du champ visuel d'un CC, TS représente la taille des sous-zones critiques et TC la taille des zones de chevauchement entre les champs visuelles des caméras. N_{CC} et N_S étant respectivement le nombre de CCs déployés et le nombre de sous-zones critiques existantes. Pour rappel, le nombre de CMs à déployer est calculé comme décrit en section 4.3.2.1 en divisant la zone d'intérêt en cellules dont la taille correspond au diamètre de la portée de détection $2 \times R_D$, le nombre de CMs correspond donc au nombre de cellules. Le nombre de CCs correspond au nombre de coins des sous-zones critiques.

TABLE 4.2 – Résultats stratégie de déploiement

Nombre de sous-zones	taille des sous-zones	Nombre de capteurs	Taux de couverture de la zone d'intérêt(%)	Taux de couverture des sous-zones critiques
3	30m x 30m	CM=9 CC=12	CM=81% CC=20.78%	CM=96.04% CC=76.97%
5	3 : 30m x 30m 2 : 40m x 40m	CM=9 CC=20	CM=81% CC=34.64%	CM=92.36% CC=58.71%

TABLE 4.3 – Nombre de capteurs déployés

	Nombre CM	Nombre CC
CTA	9	12 (3 sous-zones critiques) 20 (5 sous-zones critiques)
BASIC et OCNS	0	21 (3 sous-zones critiques) 29 (5 sous-zones critiques)

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 4.2. Le taux de couverture total de la zone d'intérêt y est représenté. Nous obtenons une couverture infrarouge de 81% en déployant seulement neuf (09) CMs. Le taux de couverture vidéo n'atteint que les 34.64% pour 20 CCs. En effet, nous ne déployons que le nombre de CCs nécessaire pour couvrir les sous-zones critiques. Si nous considérons le taux de couverture visuelle de ces sous-zones, nous atteignons jusqu'à 76.97% pour un taux de chevauchement de 8.32% alors que pour le déploiement initial nous obtenons 49.15% de couverture visuelle pour 21.49% de chevauchements. Ces résultats sont bien sûr liés au nombre de sous-zones critiques et donc au nombre de CCs déployés. Ce nombre ne dépassant pas les vingt (20) pour une taille de zone d'intérêt de 100 m x 100 m, nous pouvons aisément supposer qu'en augmentant ce nombre nous obtiendrions de meilleurs résultats.

4.4.2 Évaluation de CTA

Dans cette partie, nous évaluons les performances de la solution de suivi de cible proposée. Nous comparons CTA-d (CTA-déterministe) et CTA-p (CTA-probabiliste) avec et sans déploiement à deux autres solutions où des réseaux multimédia homogènes sont déployés : la solution BASIC, où les capteurs multimédia déployés sont actifs en permanence ; et OCNS [48], une solution basée sur une architecture en cluster et décrite dans le chapitre précédent.

Le tableau 4.3 donne la répartition des capteurs utilisés pour chaque solution. Le nombre total de capteurs déployés est le même pour toutes les solutions afin d'assurer l'équité. Cinq (05) trajectoires aléatoires ainsi que trois (03) métriques sont également utilisées pour évaluer les performances des solutions proposées : la précision du suivi, la consommation énergétique et le nombre de messages collaboratifs échangés durant le processus de suivi.

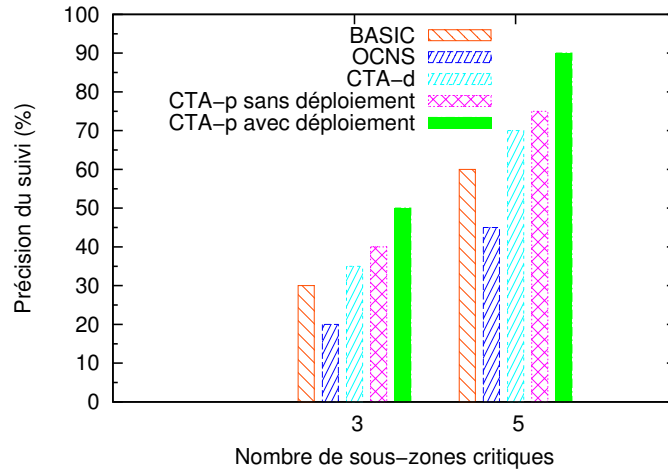


FIGURE 4.10 – Précision du suivi en fonction du nombre de sous-zones critiques

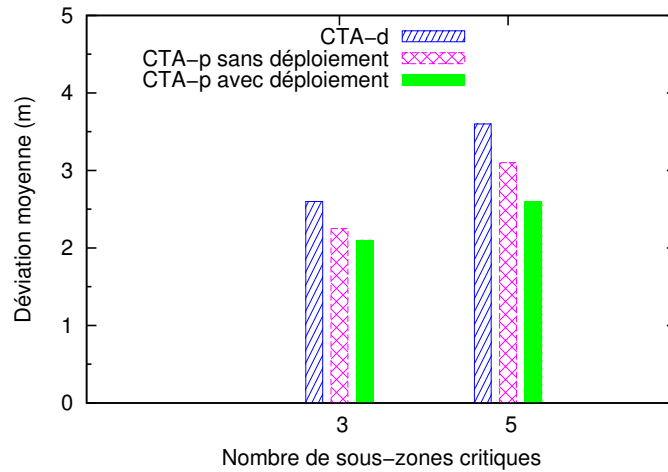


FIGURE 4.11 – Déviation moyenne en fonction du nombre de sous-zones critiques

4.4.2.1 Précision de suivi

Dans ce travail, la précision est calculée de deux façons différentes. Dans la première, nous considérons le nombre de coordonnées de la cible obtenues par une des solutions sur une trajectoire donnée. Pour CTA-d et CTA-p, ces coordonnées peuvent être aussi bien calculées par les CCs en utilisant la solution basée sur le traitement d'image détaillée dans la section 4.3.3.1.2 ou bien par le CMs en utilisant l'équation 4.2. Comme dans le chapitre précédent la meilleure précision (notée 100%) est fixée à une coordonnée chaque cinq (1/5) mètres.

La figure 4.10 illustre la précision de suivi en fonction du nombre de sous-zones critiques et donc du nombre de capteurs déployés (Tableau 4.3). Les meilleurs résultats sont obtenus par CTA-p avec stratégie de déploiement. En effet, les résultats atteignent jusqu'à 90% de précision, ce qui représente une coordonnée chaque 5.55 mètres. C'est un bon compromis étant donné le nombre de capteurs déployés. Sans surprise, BASIC

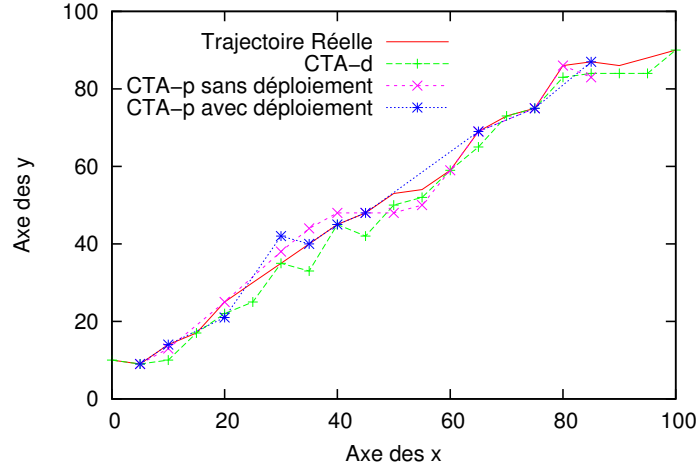


FIGURE 4.12 – Trajectoire réelle vs trajectoire obtenue par CTA (avec et sans déploiement)

obtient une meilleure précision qu'OCNS. Alors que dans BASIC les capteurs sont en permanence en état actif, dans OCNS le réveil est périodique et conditionné à la probabilité de détection de la cible.

La deuxième façon de calculer la précision consiste à comparer la trajectoire réelle et celle obtenue par la solution proposée et à calculer la déviation moyenne. Pour obtenir cette déviation moyenne, nous calculons la distance Euclidienne séparant chaque coordonnée récupérée par les deux schémas de CTA à celle de la cible au même instant. BASIC et OCNS ne sont pas représentés dans cette figure car nous supposons que les coordonnées capturées par les CCs sont exactes et sans erreurs. Par conséquent seules les coordonnées approximatives, calculées par les CMs à l'aide de l'équation 4.2 sont considérées. La figure 4.11 représente les résultats obtenus. Nous observons que la trajectoire obtenue par CTA-p sans déploiement obtient une déviation moyenne maximale de 3.1 mètres comparée à la trajectoire réelle alors que CTA-p avec stratégie de déploiement obtient une déviation moyenne maximale de 2.6 mètres. Nous observons aussi que CTA-p capture une trajectoire qui se rapproche plus de la réelle comparé à celle capturée par CTA-d, nous expliquons cela par la proportion de points récupérés par des CCs et ceux récupérés par des CMs. Cette proportion est plus élevée pour CTA-p avec déploiement que pour les deux autres schémas.

La figure 4.12 représente quant à elle un exemple de trajectoire réelle vs celles obtenues par les deux schémas de CTA.

4.4.2.2 Consommation énergétique

Cette métrique représente la quantité d'énergie consommée durant le processus de suivi. Nous y considérons le coût énergétique des différentes tâches telles que l'échange de messages, la localisation et l'observation visuelle de la cible. 100% représente l'énergie du réseau disponible avant le début des simulations. Les équations 4.6 et 4.7 donnent respectivement l'énergie consommée au niveau des CCs et des CMs durant le

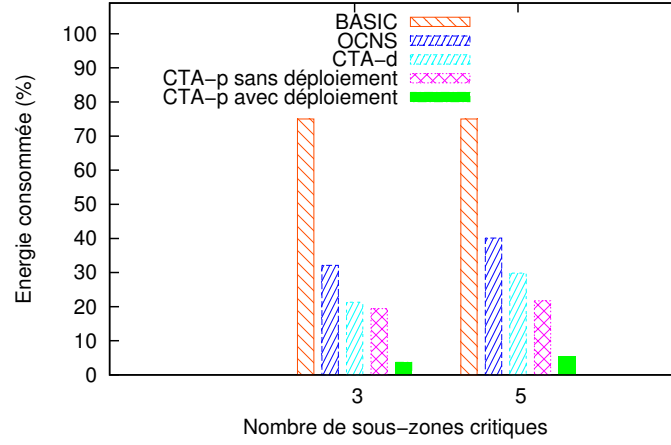


FIGURE 4.13 – Consommation d'énergie en fonction du nombre de sous-zones critiques.

TABLE 4.4 – Paramètres consommation énergétique

$NmsgT$	Nombre de messages transmis
$NmsgR$	Nombre de messages reçus
E_T	Énergie consommée pour la transmission d'un message
E_R	Énergie consommée pour la réception d'un message
T_{CMA}	Durée d'activité du capteur de mouvement
T_{CA}	Durée d'activité de la caméra
E_{CA}	Énergie consommée par la caméra pour chaque seconde d'activité
E_{CMA}	Énergie consommée par le capteur de mouvement pour chaque seconde d'activité

processus de suivi. Les différents paramètres sont définis dans le tableau 4.4.

$$E_{CC} = NmsgT \times E_T + NmsgR \times E_R + T_{CA} \times E_{CA} \quad (4.6)$$

$$E_{CM} = NmsgT \times E_T + NmsgR \times E_R + T_{CMA} \times E_{CMA} \quad (4.7)$$

La figure 4.13 illustre la consommation énergétique moyenne du réseau en fonction du nombre de sous-zones et donc du nombre de capteurs déployés. La solution BASIC est irréalisable, elle consomme jusqu'à 75% de l'énergie du réseau. CTA-p avec stratégie de déploiement permet d'économiser jusqu'à 16.5% d'énergie comparée à CTA sans stratégie de déploiement. Nous concluons que la stratégie de déploiement a un impact positif sur la consommation énergétique. CTA-p avec déploiement permet d'économiser jusqu'à 24.56% d'énergie comparé à CTA-d. Contrairement à CTA-d où le réveil des caméras dépend d'une méthode qui ne prend en considération que le nombre de message de **Détection** reçus comme condition pour réveiller les caméras, dans CTA-p le réveil est basé sur un critère probabiliste plus précis qui permet entre autre d'éviter les réveils inutiles. CTA-p consomme jusqu'à 34.84% d'énergie en moins qu'OCNS, cela s'explique d'une part par l'utilisation de CMs moins gourmands en ressources et d'autre part par le coût énergétique engendré par l'algorithme de réveil initial implémenté au niveau d'OCNS.

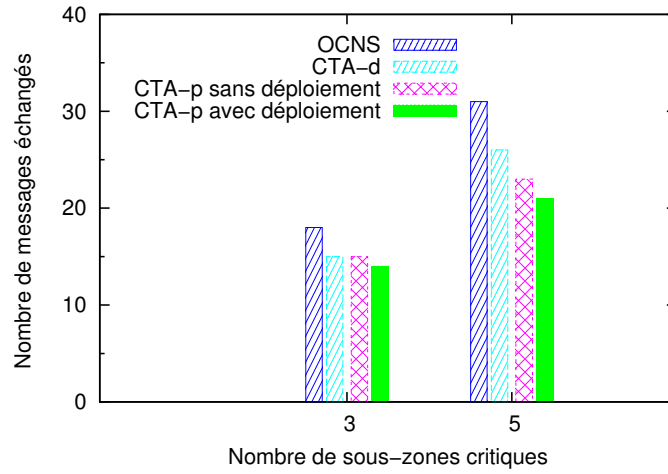


FIGURE 4.14 – Nombre de messages échangés en fonction du nombre de sous-zones critiques

4.4.2.3 Nombre de messages échangés

Le nombre de messages échangés représente le coût de communication de l'algorithme de suivi. Nous l'obtenons en comptabilisant pour chaque solution le nombre de messages collaboratifs échangés durant le processus de suivi. Pour les deux schémas de CTA, les messages comptabilisés sont les messages de **Détection** et de **Localisation**. Pour OCNS en plus des messages collaboratifs nous ajoutons les messages échangés durant le processus de réveil qui n'est pas nécessaire dans le contexte d'un réseau hétérogène. En effet, on suppose que les CMs sont toujours actifs et le réveil des CCs est conditionné aux critères mentionnés et décrits dans la section précédente.

La figure 4.14 représente le nombre de messages échangés en fonction du nombre de sous-zones critiques et par conséquent du nombre de capteurs. La solution BASIC n'est pas représentée dans cette figure car aucune collaboration n'y est implémentée. Nous observons qu'OCNS a un coût de communication plus élevé quelque soit le nombre de capteurs déployés. Cela est dû au surcoût provoqué par l'algorithme de réveil. Le mécanisme de collaboration étant le même pour CTA-d et CTA-p (avec ou sans stratégie de déploiement) le nombre de messages échangés est quasi-similaire.

4.4.3 Discussion

Les résultats des simulations entreprises permettent de déduire les points suivants :

- CTA-p avec stratégie de déploiement est la solution qui gère au mieux le compromis entre la précision du suivi et la consommation énergétique, elle accomplit le suivi avec une meilleure précision, moins d'énergie et moins de trafic réseau ;
- CTA-d ne prend pas en considération l'orientation de la caméra comme critère d'activation, ce qui provoque des réveils inutiles et une perte d'énergie ;
- l'hétérogénéité permet la localisation de la cible à tout moment dans la zone d'intérêt, que ce soit grâce aux coordonnées capturées par les caméras ou bien grâce aux coordonnées approximatives calculées par les capteurs de mouvement ;

- les capteurs de mouvement consomment moins d'énergie que les capteurs caméra ;
- la stratégie de déploiement a un impact positif sur les performances de suivi.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle approche pour le suivi de cible non-communicante. Nous avons proposé l'utilisation d'un réseau de capteurs sans fil hétérogène composé de capteurs scalaires moins gourmands en ressources, gérant la phase de détection et de capteurs multimédia plus contraints, gérant la phase de localisation.

Nous y avons implémenté une stratégie de suivi collaborative : CTA avec deux schémas. Alors que dans CTA-d le réveil des caméras est conditionné au nombre de messages reçus. Dans CTA-p le réveil des caméras est conditionné à la probabilité de détection de la cible. Nous avons mené des simulations dans le but de comparer les performances de cette stratégie à des solutions existantes. D'après les résultats obtenus, nous concluons que CTA est la solution qui gère au mieux le compromis entre la précision du suivi et la consommation énergétique. Nous avons aussi noté que quelque soit la stratégie de déploiement utilisée, cette dernière optimisait les performances de l'algorithme de suivi.

La finalité de notre travail étant le suivi de cible dans un réseau de capteur multimédia, nous nous sommes posé les questions suivantes : *comment détecter une cible non-communicante sans l'utilisation de capteurs de mouvement ?* Plus précisément *comment réveiller les capteurs caméra lorsque la cible est à leur portée ?* C'est à ces questions que nous essayons de répondre dans le chapitre suivant.

Chapitre 5

Suivi de cible non-communicante dans un environnement homogène

Sommaire

5.1	Motivation	76
5.2	Algorithme de suivi proactifs	78
5.3	Algorithme de suivi prédictif	79
5.4	Simulations et évaluation de performances	87
5.5	Conclusion	95

DANS ce chapitre nous nous intéressons au suivi de cible **non-communicante** dans un réseau de capteurs multimédia sans fil homogène. En effet, le travail présenté dans le chapitre précédent a soulevé une question importante : *comment détecter la présence d'une cible non-coopérative dans un réseau composé uniquement de capteurs multimédia ? Devons nous laisser tous les capteurs en état d'activité permanent comme dans les systèmes de surveillance vidéo classiques ?* Nous connaissons bien évidemment la réponse à cette dernière question et nous savons que cela est impossible en raison des contraintes énergétiques inhérentes à ce type de réseau.

La solution envisagée dans ce chapitre est d'implémenter un processus de suivi prenant en considération une étape de réveil. Cette étape implémente un mécanisme de réveil périodique des capteurs basé sur des critères comme la densité du réseau, la position du capteur à réveiller ou encore le nombre de capteurs voisins réveillés. Une fois qu'un des capteurs réveillés détecte la cible, le déplacement de celle-ci peut être prédit et l'information relayée de capteur en capteur. Par conséquent, seuls les nœuds qui se trouvent sur la trajectoire de la cible sont activés.

Nous proposons donc deux algorithmes prédictifs, collaboratifs et distribués. Le suivi y est décrit comme un processus comportant cinq (05) étapes : réveil, détection, localisation, prédiction et sélection du capteur successeur. Ainsi, nous présentons d'abord PTA (*Predictive Tracking Algorithm*) notre premier algorithme qui utilise un Filtre de Kalman (FK) pour la phase de prédiction. Le FK est un processus récursif à deux phases : prédiction et correction. Son utilisation se limite aux trajectoires de cible

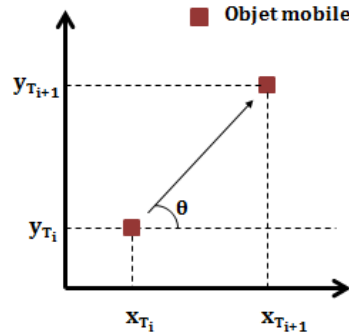


FIGURE 5.1 – Mouvement linéaire d'un objet mobile

linéaires. Ensuite, nous présentons *PMT*² (*Predictive Mobile Target Tracking*) qui utilise cette fois une version améliorée du Filtre de Kalman Étendu (FKE) combinée à un mécanisme de détection de changements de direction nommé CuSum (*Cumulative Summury*). Cette version permet de capturer des trajectoires de cibles non-linéaires et donc plus réalistes, ce qui étend son champ d'utilisation.

Pour résumer, nos contributions dans ce chapitre sont :

- un processus de suivi à cinq étapes ;
- deux solutions prédictives, l'une basée sur le FK et l'autre sur un mécanisme combiné FKE+CuSum.

Ce chapitre s'intéresse particulièrement aux modèles prédictifs et leurs impacts sur le suivi de cible. Après avoir décrit brièvement quelques uns de ces modèles dans la section 5.1, nous décrivons quelques solutions de suivi proactives les utilisant dans la section 5.2. PTA et *PMT*², nos propositions, sont détaillées dans la section 5.3. L'étude de performance est détaillée en section 5.4, nous y comparons les résultats obtenus par nos deux algorithmes. Enfin, la section 5.5 conclut ce chapitre.

5.1 Motivation

Les modèles prédictifs sont des modèles mathématiques qui permettent d'anticiper certains événements ou situations. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines comme les finances, le trafic routier, les prévisions météorologiques ou encore dans la prévision de certains phénomènes naturels comme les séismes. Plus formellement, ces modèles déterminent l'état postérieur d'un système en se basant sur ses états antérieurs. Nous comptons de nombreux modèles prédictifs dans la littérature, nous nous intéressons ici aux modèles permettant de prédire le mouvement d'une cible mobile.

Un des modèles prédictifs les plus simples est celui basé sur les caractéristiques cinétiques du mouvement. Supposons que les coordonnées actuelles de la cible sont (x_{T_i}, y_{T_i}) , l'objectif est de calculer ses futures coordonnées $(x_{T_{i+1}}, y_{T_{i+1}})$ en se basant sur la corrélation entre la position et la vitesse dans le temps. La figure 5.1 illustre un

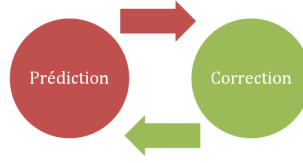


FIGURE 5.2 – Processus récursif du Filtre de Kalman

exemple de mouvement linéaire. La vitesse de la cible est calculée comme suit :

$$V = \frac{\sqrt{(x_{T_i} - x_{T_{i-1}})^2 + (y_{T_i} - y_{T_{i-1}})^2}}{t_i - t_{i-1}} \quad (5.1)$$

La direction est estimée comme décrit ci dessous :

$$\theta = \cos^{-1} \frac{(x_{T_i} - x_{T_{i-1}})}{\sqrt{(x_{T_i} - x_{T_{i-1}})^2 + (y_{T_i} - y_{T_{i-1}})^2}} \quad (5.2)$$

Enfin, les coordonnées de la cible sont obtenues comme décrit dans l'équation 5.3.

$$\begin{cases} x_{T_{i+1}} = x_{T_i} + Vt\cos(\theta) \\ y_{T_{i+1}} = y_{T_i} + Vt\sin(\theta) \end{cases} \quad (5.3)$$

Bien que le modèle présenté ci-dessus soit simple et facile à implémenter, il reste néanmoins spécifique aux cibles évoluant de manière linéaire.

Un des modèles les plus utilisés dans le domaine des réseaux de capteurs est le filtre de Kalman [82]. Il est appelé filtre car tout algorithme permettant de restituer l'état d'un système donné en éliminant le bruit qui altèrent l'information dont nous disposons sur cet état est nommé ainsi. Le FK est basé sur un schéma récursif de type prédiction-correction (figure 5.2). Il combine les informations de mesures bruitées avec celles fournies par le modèle dans le but de minimiser l'erreur entre l'état réel et l'état prédit. Dans sa forme la plus simple, le filtre de Kalman est adapté aux systèmes à évolution linéaires. D'autres filtres de Kalman ont été développés, parmi eux le filtre de Kalman étendu [65] et le *Unscented* Filtre de Kalman [35] qui sont plus adaptés aux systèmes dynamiques à évolution non-linéaire. L'avantage certain du FK est sa rapidité d'exécution. Cependant, une de ses principales limitations est qu'il fait l'hypothèse que les données d'initialisation du système sont connues. Aucune validation de ces données n'étant réalisée au préalable, les erreurs associées sont donc prises en compte par le modèle. Dans le cas particulier du Filtre de Kalman étendu, la convergence n'est pas toujours aisée à atteindre.

Les modèles AR (Modèles Autorégressifs) peuvent aussi être utilisés pour prédire le futur état d'un système. En considérant un ensemble d'observations sur un phénomène donné, ici le mouvement de la cible, l'idée la plus simple est de supposer une dépendance temporelle entre ces observations, celles-ci étant linéairement dépendantes les unes des autres. Les paramètres du modèle peuvent être calculés en utilisant les équations de Yule Walker [90].

Enfin, certains modèles probabilistes peuvent servir de modèle prédictifs, nous pouvons citer les chaînes de Markov [36][83], le théorème de Gauss-Markov [43] ou encore l'algorithme d'espérance maximisation [49].

Pour pouvoir prédire la trajectoire d'une cible, il faut savoir comment celle-ci se déplace. Assurément, le modèle de mobilité de cible est une information utile dans la conception d'un protocole prédictif. Il dépend principalement du type de cible à suivre (personne, animal, véhicule, etc) et de l'environnement de déplacement (obstacles, reliefs, etc). Plusieurs modèles existent parmi lesquels le modèle aléatoire qui se décline sous trois formes en se basant sur les caractéristiques de déplacement : vitesse aléatoire, direction aléatoire ou les deux [20]. D'autres modèles bien plus spécifiques existent, certains tiennent compte de la topologie de la zone de déplacement, d'autres considèrent le mouvement de groupe de cibles liées les unes aux autres [12]. Certains modèles sont plus faciles à anticiper que d'autres, il faut donc choisir le mécanisme de prédiction le plus adapté au modèle de déplacement de la cible.

5.2 Algorithme de suivi proactifs

Le travail présenté dans ce chapitre, contrairement aux précédents, s'intéresse aux solutions proactives. Dans celles-ci le déplacement de la cible est anticipé afin de permettre une meilleure gestion des ressources. Le plus souvent, des mécanismes de prédiction sont utilisés pour réaliser cette tâche.

Dans [18] l'objectif principal est de réduire la consommation énergétique en limitant le nombre de capteurs actifs ainsi qu'en réduisant la distance de communication entre l'émetteur et le récepteur. Pour atteindre cet objectif un ensemble d'équations linéaires est utilisé comme modèle prédictif. Les futures coordonnées de la cible sont calculées en fonction de son actuelle position et de sa vitesse.

Dans [68] une stratégie de suivi prédictive basée sur un modèle séquentiel est proposée. Deux étapes principales sont implémentées : la génération du modèle et le suivi de la cible. Dans la première étape, des données sur le mouvement de la cible sont récoltées et traitées afin d'extraire les informations utiles à l'étape suivante. Dans la seconde étape, le processus de suivi débute et les capteurs concernés sont activés.

Les auteurs de [41] proposent une approche intéressante, ils prédisent le taux d'erreur dans la localisation au lieu de prédire la future position de la cible comme le font la plupart des travaux dans ce domaine. Ainsi ces erreurs peuvent être évitées. Cette solution peut gérer les changements de direction de la cible tant que sa vitesse reste approximativement constante.

Les auteurs de [42] utilisent le processus de Gauss-Markov pour modéliser le comportement de la cible et fournir ainsi des paramètres de mobilité à l'algorithme de prédiction. Dans [90] les auteurs proposent l'utilisation de modèles autoregressifs pour gérer la mobilité dans les réseaux cellulaires. Il proposent deux déclinaisons de ce modèle : l'un basé sur un modèle AR (*Autoregressive model*) d'ordre (1) où seules la position et la vitesse de la cible sont considérées comme paramètres. L'autre nommée position-AR, qui contrairement au premier considère de plus l'accélération de la cible comme paramètre. Les modèles AR-1 et position-AR sont plus généraux que le modèle Gauss-Markov mentionné précédemment. En effet, ce dernier considère la position, la vitesse et la direction de la cible alors que pour les modèles AR la direction est remplacé par l'accélération.

Dans [89] les auteurs utilisent cette fois le filtre de Kalman pour prédire le déplacement des cibles mobiles dans les réseaux cellulaires. Ce modèle souffre de limitations

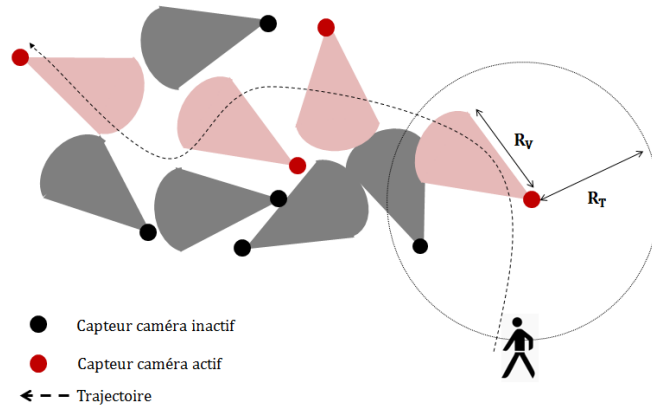


FIGURE 5.3 – Réseaux de capteurs sans fil multimédia homogène

dues principalement à la nécessité de linéarisation du processus. Cela conduit à des imprécisions au niveau du suivi. Le travail proposé dans [76] utilise aussi le filtre de Kalman pour le suivi de cibles multiples dans un réseau de capteurs multimédia. Dans ce contexte, le filtre est utilisé pour restituer au mieux les données des images capturées en éliminant les effets négatifs des occlusions, des variations d'éclairages, etc.

Dans ce chapitre nous nous intéressons aux mécanismes de suivi proactifs. Les solutions détaillées ci-dessus adoptent toutes ce type de mécanisme qui s'avère très efficace pour anticiper les besoins et exploiter cette information au mieux pour atteindre l'objectif souhaité. Certaines d'entre elles sont plus adaptées aux systèmes à évolution linéaires [18] [86] [68] [89] et d'autres à des évolutions non-linéaires [41]. Dans ce qui suit nous allons présenter une solution pour chaque type de système en tenant compte des contraintes liées aux réseaux de capteurs sans fil multimédia.

5.3 Algorithme de suivi prédictif

Dans cette section, nous allons décrire le type de capteurs déployés. Ensuite, nous détaillerons chacune des solutions proactives proposées.

5.3.1 Description du système

Comme nous l'avons précisé plus haut, la question à laquelle nous tentons de répondre dans ce chapitre est : *comment détecter la présence d'une cible non-coopérative dans un réseau composé uniquement de capteurs multimédia et où aucun détecteur de présence n'est déployé*? Nous déployons donc un réseau de capteurs homogènes, composé de capteurs caméra (CC) disposant d'une portée visuelle R_V et d'une portée de communication R_T . Un exemple du réseau déployé est illustré dans la figure 5.3. Ces CCs sont déployés suivant la stratégie de déploiement W-VFA décrite dans le chapitre 3. Suite à la phase de déploiement, chaque CC connaît sa position et son orientation. Nous supposons que chaque capteur connaît ses voisins immédiats (ID, coordonnées et orientation) grâce à un échange préalable de messages.

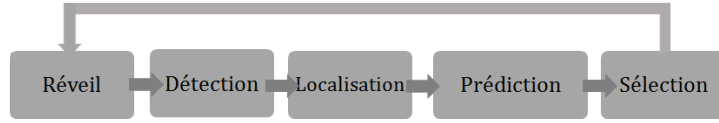


FIGURE 5.4 – Les cinq étapes de PTA

5.3.2 PTA : *Predictive Tracking Algorithm*

PTA est une solution de suivi distribuée qui se décompose en cinq étapes successives et complémentaires illustrées dans la figure 5.4 et décrites ci-dessous :

5.3.2.1 Réveil

Dans la plus part des applications de suivi, la cible apparait de manière asynchrone dans la zone d'intérêt. Ainsi, mettre en permanence les capteurs en état actif est évidemment inutile et coûteux. Initialement, nous considérons donc que tous les capteurs sont en hibernation. Le module de communication restant toujours actif pour des raisons de collaboration. Périodiquement, un sous-ensemble de nœuds est activé. Afin de garantir la qualité de la surveillance tout en préservant au mieux les ressources, deux paramètres importants sont à considérer [92] : le nombre de capteurs composant ce sous-ensemble et leur fréquence de réveil. Pour calculer le nombre N_{SE} de capteurs composant chaque sous-ensemble, nous nous basons sur la densité totale des capteurs déployés, la taille de la zone d'intérêt et la taille du champ visuel des CCs comme décrit dans l'équation suivante :

$$N_{SE} = TailleZoneInterêt \times \frac{c}{TailleChampVisuel} \quad (5.4)$$

Où c est une constante qui définit le taux de couverture souhaité.

La fréquence de réveil est quant à elle fixée en fonction du contexte applicatif en considérant par exemple la vitesse de déplacement moyenne de la cible. Une fois les valeurs de ces deux paramètres fixées, les capteurs à réveiller sont choisis en fonction de leurs positions. Nous supposons que la cible pénètre dans la zone d'intérêt par une de ses bordures, ainsi les capteurs se trouvant proche de cette bordure ont la priorité. Lorsque le sous-ensemble sélectionné est désactivé, un autre est activé. Le processus est répété jusqu'à ce que la cible soit détectée.

5.3.2.2 Détection

Chaque capteur multimédia réveillé capture des images de son champ de vision. En utilisant la technique du *background subtraction* [10], il vérifie si une cible se trouve à sa portée visuelle. Pour rappel, cette méthode consiste à superposer et à comparer l'image courante et l'initiale, prise durant la phase de déploiement. Si la cible est détectée, la prochaine étape peut débuter. Autrement, le capteur se remet en hibernation.

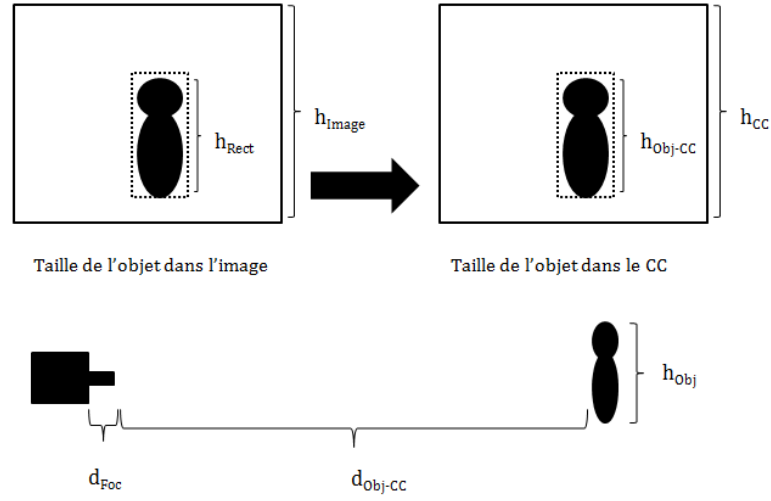


FIGURE 5.5 – Processus à suivre pour calculer la distance entre le capteur caméra et la cible [60]

5.3.2.3 Localisation

Contrairement aux solutions classiques utilisant la puissance du signal reçu ou tout autre technique de géo-localisation impliquant au minimum trois (03) nœuds [19] [53], dans ce travail, la localisation est effectuée à l'aide d'une solution basée sur le traitement d'image [60] et impliquant un seul nœud à la fois. Dans cette solution, l'idée est d'estimer la distance entre la cible et le capteur. En disposant de cette information clé et partant de l'hypothèse que chaque capteur connaît ses coordonnées, la position de la cible peut ainsi être déduite. Dans un premier temps, la taille de l'objet dans la caméra du capteur h_{Obj-CC} doit être calculée en utilisant l'équation 5.5, pour cela trois (03) données sont requises : la hauteur du capteur h_{CC} , la hauteur de l'image h_{Image} et la hauteur du rectangle bordant l'objet dans l'image h_{Rec} .

$$h_{Obj-CC} = h_{CC} \frac{h_{Rec}}{h_{Image}} \quad (5.5)$$

Dans un second temps, la distance d_{Obj-CC} séparant l'objet de la caméra doit être estimée en exploitant cette fois-ci la hauteur estimée de l'objet dans la réalité h_{Obj} ainsi que la distance focale de la caméra du capteur d_{Foc} . h_{Obj} est obtenu en se basant sur la hauteur de placement de la caméra.

$$d_{Obj-CC} = h_{Obj} \frac{d_{Foc}}{h_{Obj-CC}} \quad (5.6)$$

Enfin, la position de la cible peut être déduite en se basant sur la position du capteur. La figure 5.5 illustre ce mécanisme. Une fois la cible localisée, le CC calcule les futures coordonnées de la cible comme décrit dans la phase suivante.

5.3.2.4 Prédiction

La prédiction est l'étape la plus importante dans notre processus de suivi. Son objectif principal est d'obtenir les informations nécessaires afin de sélectionner au mieux les capteurs à activer. Pour cela, le mouvement de la cible est anticipé et les capteurs se trouvant sur sa trajectoire sont réveillés. Dans cette partie, nous utilisons le filtre de Kalman, un modèle prédictif à deux étapes : prédiction et correction. Il permet d'estimer de façon récursive l'état du processus en se basant sur ses états antérieurs. Dans ce travail, il s'attache à estimer la future position de la cible en se basant sur la courante. Il est décrit à l'aide d'un modèle d'évolution d'état et un modèle de mesure qu'il suppose linéaires avec des erreurs gaussiennes.

Modèle d'évolution d'état :

$$X_{t+1} = AX_t + W_t \quad (5.7)$$

Modèle de mesure :

$$Z_t = HX_t + V_t \quad (5.8)$$

X_{t+1} est le vecteur d'état. Comme nous nous intéressons ici au suivi de cible mobile, l'état décrit donc la position et la vitesse de cette cible à l'instant $t + 1$ comme suit :

$$X_{t+1} = [x_{t+1}, v_{x_{t+1}}, y_{t+1}, v_{y_{t+1}}]'$$

x_{t+1} et y_{t+1} sont les coordonnées de la cible et $v_{x_{t+1}}$ et $v_{y_{t+1}}$ représentent sa vitesse. Z_t est le vecteur de mesure où x_{z_t} et y_{z_t} représentent les coordonnées mesurées, il est décrit comme suit :

$$Z_t = [x_{z_t}, y_{z_t}]'$$

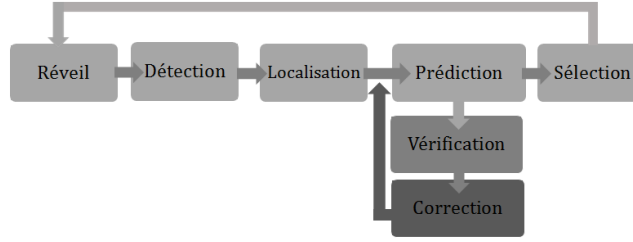
Dans l'équation 5.7, A représente la matrice de transition, elle définit la relation entre les différents composants du vecteur d'état. La prédiction étant basée sur la corrélation entre la position et la vitesse de la cible entre l'instant t et $t + 1$. Conformément au vecteur d'état et aux caractéristiques du mouvement cinétique, A a la valeur suivante :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

H est quant à elle la matrice des mesures, elle relie le vecteur d'état à celui des mesures et est décrite comme suit :

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Enfin, W_t et V_t sont des bruits blancs Gaussiens à moyenne nulle et variances respectives Q_{wt} et Q_{vt} . Nous les supposons indépendants. Comme nous l'avons mentionné plus haut, le filtre de Kalman est un processus récursif à deux phases. Dans la phase de prédiction, l'estimation de l'état ainsi que de la matrice de covariance est réalisé. Dans la phase de correction, le gain de Kalman est calculé, l'état et la matrice de covariance sont mis à jour. Les équations de chaque étape sont présentées ci-dessous.

FIGURE 5.6 – Les étapes de PMT^2

Prédiction :

$$\hat{X}_{t+1} = A\hat{X}_t \quad (5.9)$$

$$P_{t+1} = AP_tA' + Q_{wt} \quad (5.10)$$

Correction :

$$K_{t+1} = P_{t+1|t}H'(HP_{t+1|t}H' + Q_{vt})^{-1} \quad (5.11)$$

$$\hat{X}_{t+1|t+1} = \hat{X}_{t+1|t} + K_{t+1}(Z_{t+1} - H\hat{X}_{t+1|t}) \quad (5.12)$$

$$P_{t+1|t+1} = (I - K_{t+1}H)P_{t+1|t} \quad (5.13)$$

Nous obtenons comme résultats les futures coordonnées de la cible. Le CC courant les exploite afin de sélectionner le capteur le mieux placé pour détecter la cible.

5.3.2.5 Sélection du capteur successeur

Une fois que les futures coordonnées de la cible sont calculées par le capteur, ce dernier sélectionne parmi ses voisins le prochain qui lui succédera dans sa tâche. Pour être sélectionné, un capteur doit satisfaire le *Target in Sector Test* [59]. Ce test est décrit dans le chapitre 3. Pour rappel ce dernier vise à vérifier si la cible se trouve à la portée visuelle du CC en calculant la distance entre chaque capteur voisin et les coordonnées prédites. Le capteur qui a la plus petite distance sera sélectionné. Le capteur courant l'activera en envoyant un message de **réveil**. Ce message contient l'identifiant du capteur émetteur. Chaque coordonnée calculée par les CCs est envoyée au puits qui se chargera de reconstituer la trajectoire complète de la cible.

5.3.3 PMT^2 : *Predictive Mobile Target Tracking*

PMT^2 tout comme PTA est un algorithme de suivi de cible prédictif décomposé en cinq (05) principales étapes. Alors que PTA est utilisé pour prédire le déplacement de cibles à évolution linéaire, PMT^2 est mieux adapté aux cibles à évolution non-linéaire avec de possibles changements brusques de trajectoires. La principale différence entre les deux réside dans l'étape de prédiction. Alors que dans le premier, le filtre de Kalman dans sa forme la plus simple est utilisé, PMT^2 utilise le filtre de Kalman étendu, une version de ce filtre plus adaptée aux modèles non-linéaires et donc aux trajectoires de cible plus réalistes, sujettes à des changements brusques de direction. La figure 5.6 illustre le processus complet de PMT^2 . Dans cette section, nous ne décrivons donc que

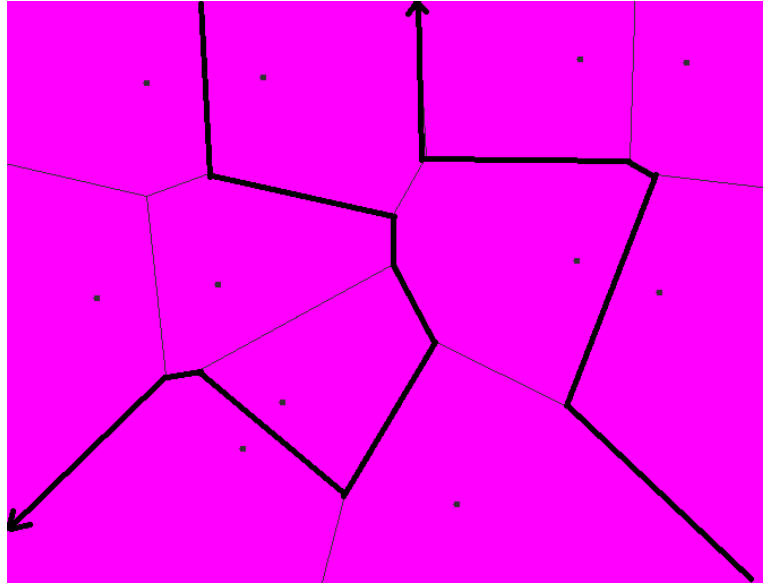


FIGURE 5.7 – Exemple illustratif d'un diagramme de Voronoi

l'étape de prédiction, nous supposons que les quatre (04) autres étapes sont identiques à PTA. Auparavant, nous allons détailler le modèle de mobilité de la cible, qui comme nous l'avons dit précédemment est liée à la stratégie de prédiction.

5.3.3.1 Modèle de mobilité de la cible

Nous considérons dans PMT^2 que la cible se déplace suivant le modèle de mobilité proposé dans [32]. Nous supposons donc dans ce qui suit qu'une **seule** cible traverse la zone d'intérêt de manière aléatoire en empruntant une des trajectoires possibles constituant le graphe de mobilité de la cible. Ce modèle prend en considération la topologie de la zone d'intérêt pour modéliser le mouvement de la cible. La topologie d'une aire inclue les reliefs, les occlusions et tout autre élément pouvant être un obstacle au déplacement de la cible. Le principe général est décrit comme suit : une fois les positions, les formes et les tailles des obstacles saisies, le diagramme de Voronoi est utilisé pour déterminer les chemins possibles entre ces barrières. Le diagramme de Voronoi est un constructeur de graphe assez connu dans le domaine des réseaux de capteurs. Il est souvent utilisé pour modéliser le mouvement d'objet ou de nœuds dans une aire donnée et résoudre ainsi des problématiques comme le déploiement de capteurs [40]. Dans un espace en 2D, considérant un ensemble de points, ce diagramme divise cet espace en un groupe de cellules de forme polygones, tels que tous les points se trouvant à l'intérieur d'une cellule sont plus proches d'un point p que de tout autre point dans l'aire principale. Le graphe obtenu décrit toutes les trajectoires possibles que la cible peut emprunter dans une zone donnée. La figure 5.7 illustre un exemple de diagramme de Voronoi avec des exemples de trajectoires possibles. Nous observons bien que les trajectoires générées par le digramme sont non-linéaires et que les changements brusques de direction sont fréquents.

5.3.3.2 Prédiction

Comme pour PTA, cette étape est la plus importante dans le processus du suivi. Le déplacement de la cible est anticipé et le processus de suivi relayé de nœud en nœud jusqu'à ce que la cible quitte la zone d'intérêt. Pour ce faire, une version améliorée du filtre de Kalman Étendu est proposée. Le Filtre de Kalman Étendu (FKE) est une extension du Filtre de Kalman standard pour les modèles non-linéaires. Il permet de prédire les futures coordonnées de la cible en se basant sur sa position actuelle. Il se décompose habituellement en deux phases : prédiction et correction. Dans ce travail, nous proposons d'ajouter une phase de vérification.

Le FKE est décrit à l'aide d'un modèle d'évolution d'état et un autre de mesure qu'il suppose non-linéaires comme suit :

Modèle d'évolution d'état :

$$X_{t+1} = f_t(X_t) + w_t \quad (5.14)$$

Modèle de mesure :

$$Z_t = h_t(X_t) + v_t \quad (5.15)$$

X_{t+1} est le vecteur d'état. Comme le modèle est cette fois non-linéaire, l'état décrit donc la position, la vitesse et l'accélération de la cible à l'instant $t + 1$.

$$X_{t+1} = [x_{t+1}, v_{x_{t+1}}, a_{x_{t+1}}, y_{t+1}, v_{y_{t+1}}, a_{y_{t+1}}]' \quad (5.16)$$

Où x_{t+1} et y_{t+1} sont les coordonnées de la cible ; $v_{x_{t+1}}$ et $v_{y_{t+1}}$ représentent sa vitesse ; enfin, $a_{x_{t+1}}$ et $a_{y_{t+1}}$ représentent son accélération.

Z_t est le vecteur de mesure où x_{z_t} et y_{z_t} sont les coordonnées mesurées. Il est décrit comme suit :

$$Z_t = [x_{z_t}, y_{z_t}]' \quad (5.17)$$

$f_t(\cdot)$ et $h_t(\cdot)$ sont des fonctions non-linéaires ; W_t et V_t sont des bruits blancs Gaussiens à moyenne nulle et variances respectives Q_{wt} et Q_{vt} . Nous les supposons indépendants. Ci-dessous, les phases de prédiction, vérification et correction sont décrites.

5.3.3.2.1 Phase de prédiction Durant cette phase, $\hat{X}_{t+1|t}$, le vecteur d'état estimé à l'instant $t + 1$ est obtenu à l'aide de l'équation 5.18. De même, la matrice de covariance associée au vecteur d'état prédit est obtenue à l'aide l'équation 5.19.

$$\hat{X}_{t+1|t} = f_t \hat{X}_{t|t} \quad (5.18)$$

$$P_{t+1|t} = F_t P_{t|t} F_t' + Q_{wt} \quad (5.19)$$

F_t est la matrice Jacobienne de la fonction de transition d'état f_t , elle est obtenue comme suit :

$$F_t = \frac{\partial f}{\partial X} \bigg|_{\hat{X}_{t|t}}$$

5.3.3.2.2 Phase de vérification L'objectif de cette phase est de vérifier si les coordonnées prédites se trouvent bien sur une des trajectoires possibles de la cible définies à l'aide du modèle de mobilité décrit dans la section 5.3.3.1. Pour cela, on doit déterminer si les coordonnées de la cible obtenues lors de la phase de prédiction appartiennent à une des droites formant le graphe. Si c'est le cas, nous passons à la phase de correction, sinon, nous les corrigeons en les remplaçant par les coordonnées les plus proches se trouvant sur le graphe.

5.3.3.2.3 Phase de correction Cette étape a pour objectif la correction des coordonnées de la cible prédite. Alors que dans la phase de vérification celles-ci sont corrigées en fonction du graphe de mobilité de la cible, dans cette étape, les coordonnées sont corrigées en fonction des mesures. Pour cela nous commençons par calculer K_{t+1} , le gain de Kalman qui décide du degré d'importance de l'intégration de la mesure.

$$K_{t+1} = P_{t+1|t} H'_{t+1} [H_{t+1} P_{t+1|t} H'_{t+1} + Q_{v_{t+1}}]^{-1} \quad (5.20)$$

H_t est la matrice Jacobienne de la fonction d'observation h_t , elle est obtenue comme suit :

$$H_t = \frac{\partial h}{\partial X} \Big|_{\hat{X}_{t|t+1}}$$

Enfin, le vecteur d'état $\hat{X}_{t+1|t+1}$ et la matrice de covariance correspondante $P_{t+1|t+1}$ sont mis à jour.

$$\hat{X}_{t+1|t+1} = \hat{X}_{t+1|t} + K_{t+1} [Z_{t+1} - H_{t+1} \hat{X}_{t+1|t}] \quad (5.21)$$

$$P_{t+1|t+1} = [I - K_{t+1} H_{t+1}] P_{t+1|t} \quad (5.22)$$

Le caractère imprévisible de la cible ainsi que les différents obstacles se trouvant sur sa trajectoire peuvent provoquer des changements brusques de direction. Nous proposons donc de coupler le FKE avec un mécanisme de détection de changements nommé CuSum (*CUMulative SUMmury*) [26]. En considérant un paramètre, la moyenne par exemple, Cusum permet de détecter un changement dans sa valeur et de décider si une correction est nécessaire ou non. Nous utilisons CuSum aussi bien pour sa réactivité que pour ses performances dans un contexte de suivi où la zone de déploiement compte de nombreux obstacles contraignant la cible à les éviter. En considérant le FKE, un changement de direction brusque peut être détecté en examinant le modèle de mesure Z_{t+1} . Si l'évolution des coordonnées est constante alors Z_{t+1} est un processus à moyenne nulle et bruit blanc. Sinon, la moyenne va s'éloigner du zero. Le test est décrit comme suit :

$$g_{t+1} = g_t + S_{t+1} - v \quad (5.23)$$

Initialement $g_{t+1} = 0$, S_{t+1} est le processus de mesure normalisé, il est décrit comme suit :

$$S_{t+1} = \frac{Z_{t+1} - H_{t+1} \hat{X}_{t+1|t}}{\sqrt{(P_{t+1|t} + Q_{wt}) H_t^2 + Q_{vt}}} \quad (5.24)$$

Dans l'équation 5.23, le paramètre v est très important, il permet d'éviter les fausses alarmes. Sa valeur est soustraite à chaque itération, plus cette valeur est petite, plus le test est sensible aux fluctuations. h représente le seuil de déclenchement de l'alarme.

TABLE 5.1 – Paramètres de simulation

Couche Phy et Mac	IEEE 802.15.4
Mode d'accès	CSMA/CA non-beaconed
Taille de la zone d'intérêt	100m x 100m
Vitesse de la cible	1.38 m/s (piéton)
Nombre de capteurs Caméra	10, 20, 30
Temps de simulation	200 s
Portée de transmission des capteurs caméra(R_T)	30 m
Portée de capture vidéo (R_V)	20 m
Angle d'ouverture du champ de vision de la caméra(2α)	$\pi/3$
Taille des messages	100 bytes
Paramètre CuSum v	0.5
Paramètre CuSum h	5
Nombre de trajectoire	5

TABLE 5.2 – Paramètres du modèle énergétique (Imote2) [2] [4]

Énergie initiale des capteurs	3 AAA
Mode actif	0.279 Joule/Second
Mode hibernation (Radio on Camera off)	0.226 Joule/Seconde
Mode inactif(Radio off Camera off)	0.015 Joule/Seconde
Mode transmission/ réception (Fréquence 104 MHz)	0.078 Joule/Seconde
Camera on	0.044 Joule/Second

En effet, un changement de direction est détecté lorsque $g_{t+1} > h$. De même que pour v , plus la valeur de h est petite plus le test est sensible, il faut donc choisir ces valeurs en fonction de l'application. Cette condition est considérée comme la condition d'arrêt du test CuSum. Après le déclenchement de l'alarme la valeur de g_{t+1} est remise à zero.

5.4 Simulations et évaluation de performances

Dans cette section, les paramètres de simulation, les métriques d'évaluation et les résultats sont discutés. Pour évaluer PTA et PMT^2 , nous utilisons le simulateur NS-2. Le tableau 5.1 résume les paramètres de simulation utilisés pour les deux solutions. Nous nous inspirons des caractéristiques réelles des imote2 [2] pour fixer la valeur de quelques paramètres tels que la portée de transmission et la portée visuelle. Pour PMT^2 , on se base sur des simulations préliminaires pour déterminer les valeurs respectives de v et h utilisées dans le test CuSum, ces valeurs sont celles qui permettent de gérer au mieux le compromis entre la précision du suivi et la consommation d'énergie.

Nous allons d'abord commencer par évaluer les performances de PTA en utilisant

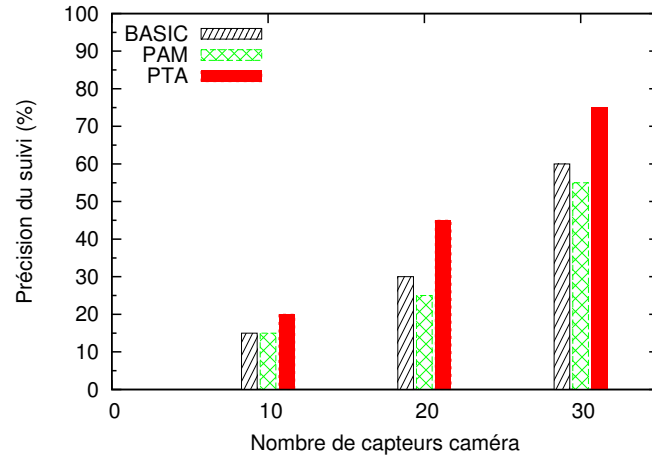


FIGURE 5.8 – Précision du suivi en fonction du nombre de capteurs caméra

des trajectoires de cibles linéaires compatibles avec le modèle utilisé. Ensuite, nous évaluerons PMT^2 en utilisant cette fois des trajectoires de cibles non-linéaires. Nous nous baserons dans les deux cas sur quatre (04) métriques pour évaluer nos propositions : la précision du suivi, la déviation moyenne, la consommation énergétique et le nombre de messages collaboratifs échangés durant le processus de suivi. Nous utilisons la stratégie de déploiement W-VFA décrite dans le chapitre 3 pour déployer les capteurs dans PTA et PMT^2 .

5.4.1 Évaluation de PTA

Nous comparons PTA à deux (02) autres solutions : BASIC, une solution de référence décrite dans les précédents chapitres ainsi que PAM, une autre solution prédictive basée sur un modèle Autoregressif d'ordre-1 pour les systèmes linéaires [90] décrite dans la section 5.2.

5.4.1.1 Précision du suivi

C'est la métrique la plus importante, elle détermine l'efficacité du processus de suivi proposé. Elle est obtenue en comptabilisant le nombre de coordonnées récupérées par un algorithme sur une trajectoire donnée. La figure 5.8 illustre les résultats obtenus. Nous observons que la précision augmente en fonction du nombre de capteurs caméra déployés, 30 CCs déployés représente un bon compromis entre la précision de suivi obtenue et le nombre de CCs déployés. Sur des trajectoires linéaires, PTA obtient les meilleurs résultats avec 75% de précision pour 30 CCs. Ce qui équivaut à 1 point chaque 6.66 mètres. Ces résultats sont dus d'une part à l'efficacité du filtre de Kalman et de son processus récursif à deux phases, d'autre part la stratégie de déploiement qui a un impact positif sur ces performances. PAM qui utilise un modèle Autoregressif d'ordre-1 est moins efficace. En effet, contrairement au filtre de Kalman qui implémente deux phases : prédiction et correction, PAM n'utilise qu'une phase, la prédiction est donc moins précise et les erreurs plus fréquentes. La solution BASIC obtient de meilleurs résultats que PAM en raison de l'état d'activité permanent des CCs. Elle obtient

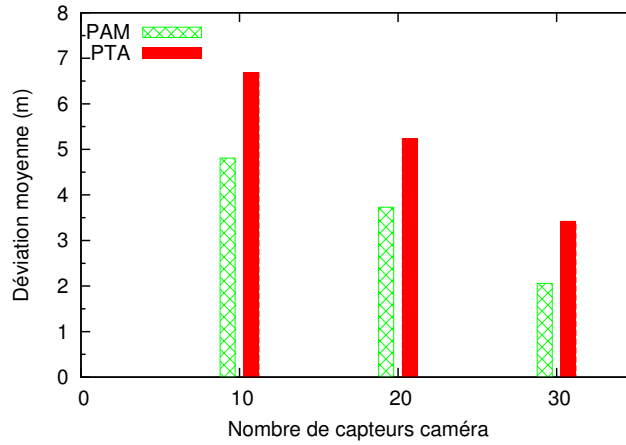


FIGURE 5.9 – Déviation moyenne en fonction du nombre de capteurs caméra

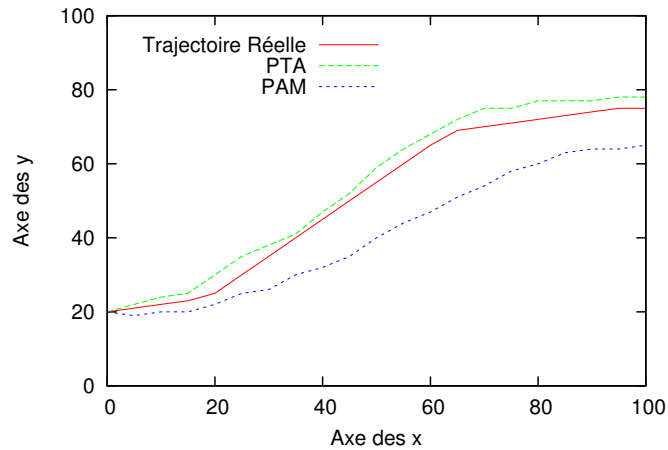


FIGURE 5.10 – Trajectoire réelles vs trajectoire prédite par PTA et PAM

cependant de moins bons résultats comparé à PTA. En effet, alors que pour PTA les capteurs sont déployés en utilisant W-VFA (Chapitre 3), dans BASIC les capteurs sont déployés de façon aléatoire. Nous concluons donc que l'impact de la stratégie de déploiement est plus important que le nombre de CCs actif.

5.4.1.2 Déviation moyenne

L'objectif ici est de comparer la trajectoire réelle de la cible avec celle prédite par les solutions proactives. Pour obtenir cette déviation moyenne, nous calculons la distance Euclidienne séparant chaque coordonnée récupérée par PTA ou PAM à celle de la cible au même instant. La figure 5.9 représente les résultats obtenus. Alors que PTA obtient 3.6m de déviation moyenne, PAM obtient 5.1m.

La figure 5.10 donne un exemple de trajectoire réelle vs les trajectoire prédite par PTA et PAM, nous l'obtenons en récupérant toutes les coordonnées calculées par PTA et PAM. Nous observons que la trajectoire prédite par PTA est plus proche de la réelle comparée à la trajectoire prédite par PAM.

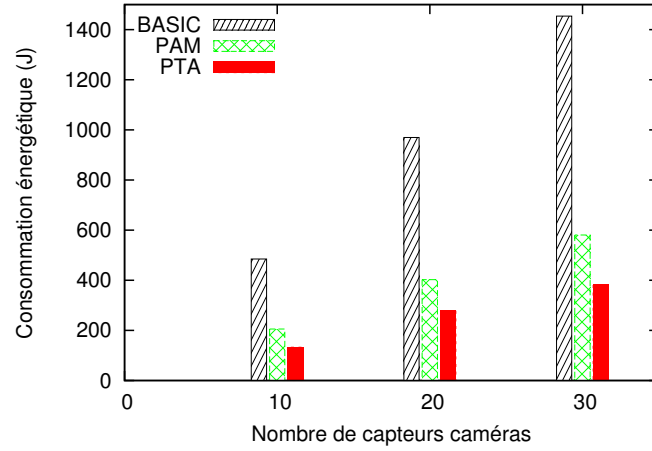


FIGURE 5.11 – Consommation d'énergie en fonction du nombre de capteurs caméra

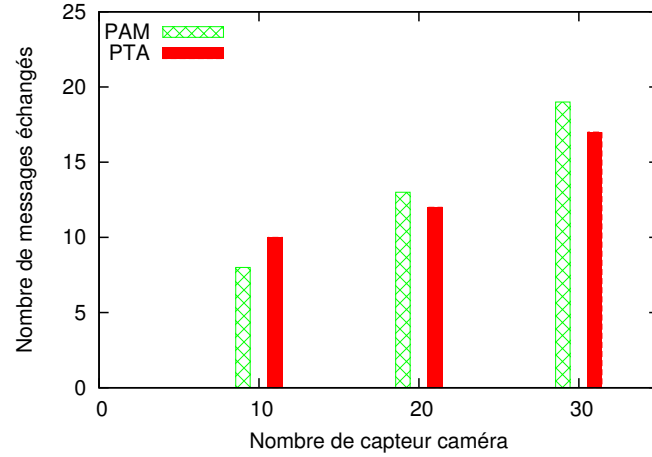


FIGURE 5.12 – Nombre de messages échangés en fonction du nombre de capteurs caméra

5.4.1.3 Consommation énergétique

Pour cette métrique nous nous basons sur le modèle énergétique de NS-2 [22] et la consommation réelle des imote2 [2] [4]. Ces paramètres sont résumés dans le tableau 5.2. Pour évaluer l'énergie consommée durant le processus de suivi, nous comptabilisons le coût énergétique des différentes tâches telles que les réveils des caméras, leur temps d'activité, la localisation et l'échange de messages. La figure 5.11 montre la consommation énergétique moyenne du réseau. Comme attendu, BASIC consomme beaucoup plus d'énergie que les autres solutions. Ces résultats sont expliqués par l'état d'activité permanent des capteurs caméras. PTA montre de bonnes performances, grâce au modèle prédictif, seuls les capteurs caméra sur la trajectoire de la cible sont activés. PAM consomme plus d'énergie que PTA, nous l'expliquons par le réveil inutile des caméras dû au erreurs de prédiction. En effet, ces erreurs sont plus fréquentes dans PAM et engendrent donc des réveils inutiles de caméras et la perte de ressources.

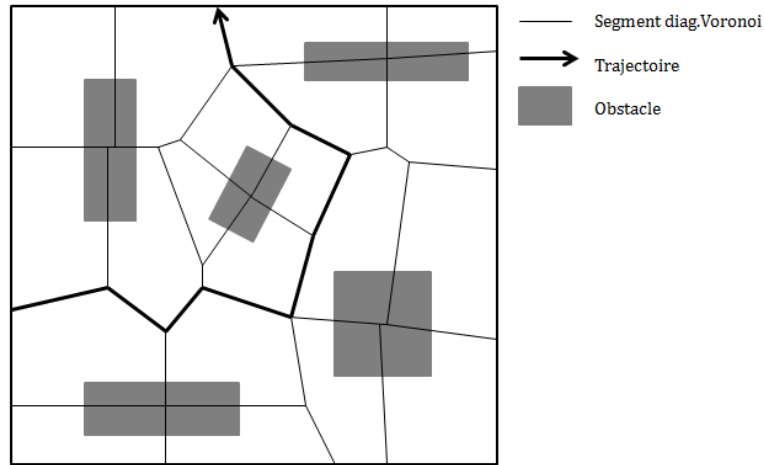


FIGURE 5.13 – Terrain de simulation

5.4.1.4 Nombre de messages échangés

Nous comptabilisons le coût de communication de PTA et PAM. La solution BASIC n'ayant pas de stratégie de collaboration entre les nœuds implémentée, elle n'est donc pas représentée. La figure 5.12 illustre les résultats obtenus. Nous observons que PTA et PAM ont approximativement le même nombre de messages échangés, le processus de collaboration entre les capteurs étant le même. En effet, seuls des messages de **Réveil** sont échangés.

5.4.2 Évaluation de PMT^2

Nous comparons PMT^2 à trois (03) autres solutions : BASIC décrite dans le chapitre précédent, OCNS, une solution implémentée sur un réseaux de capteurs multi-média sans fil homogène et décrite dans les précédents chapitres et PTA. Nous comparons PMT^2 à PTA pour observer comment réagissent les modèles conçus pour les trajectoires linéaires lorsque celles-ci ne le sont pas. Comme nous l'avons mentionné plus haut, nous utilisons des trajectoires non-linéaires pour l'évaluation, la figure 5.13 illustre un exemple d'une zone d'intérêt utilisée pour les simulations, le diagramme de Voronoi représenté montre les trajectoires possibles, un exemple est illustré en gras.

5.4.2.1 Précision du suivi

De même que pour PTA cette métrique est mesurée en fonction du nombre de coordonnées obtenues sur une trajectoire donnée. La figure 5.14 illustre les résultats obtenus. PMT^2 obtient les meilleures performances, elle atteint jusqu'à 95% de précision pour 30 CCs, ce qui représente 1 point chaque 5.26 mètres. Nous expliquons ces résultats par l'efficacité du mécanisme de prédiction. En effet, le couplage FKE et CuSum permet de capturer des trajectoires de cible réalistes. Pour 30 CCs, PMT^2 améliore la précision de 30% comparé à BASIC, de 45% comparé à OCNS et de 35% comparé à PTA. PTA surpasse de 10% OCNS, ce qui démontre une fois supplémentaire l'impact de la stratégie de déploiement sur les performances du suivi.

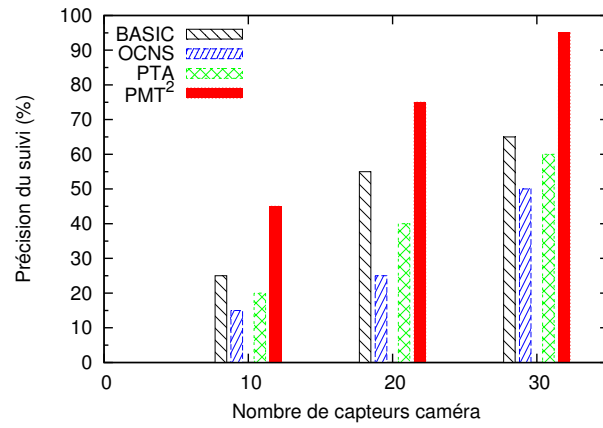


FIGURE 5.14 – Précision du suivi en fonction du nombre de capteurs caméra

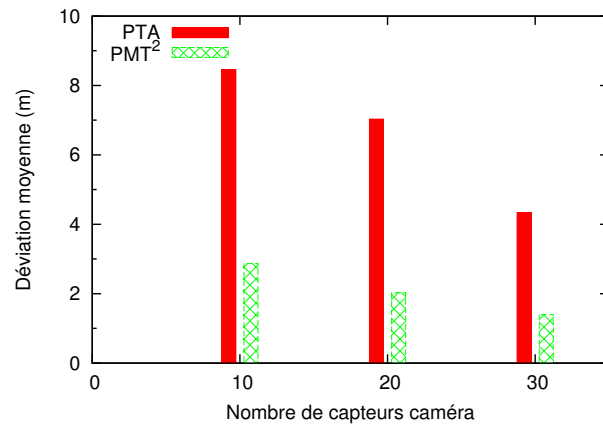


FIGURE 5.15 – Déviation moyenne en fonction du nombre de capteurs caméra

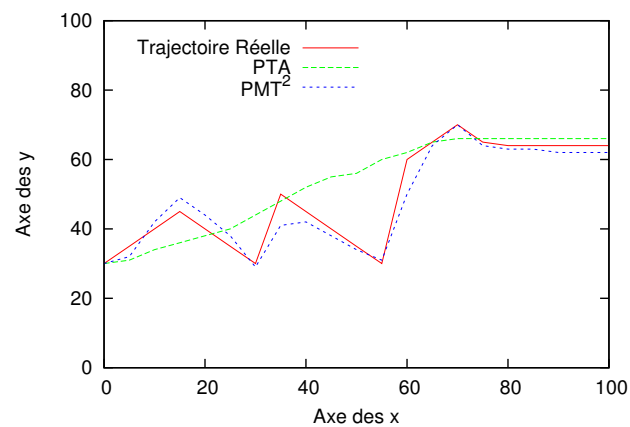


FIGURE 5.16 – Trajectoire réelle vs vs trajectoire prédite par PMT^2 et PTA

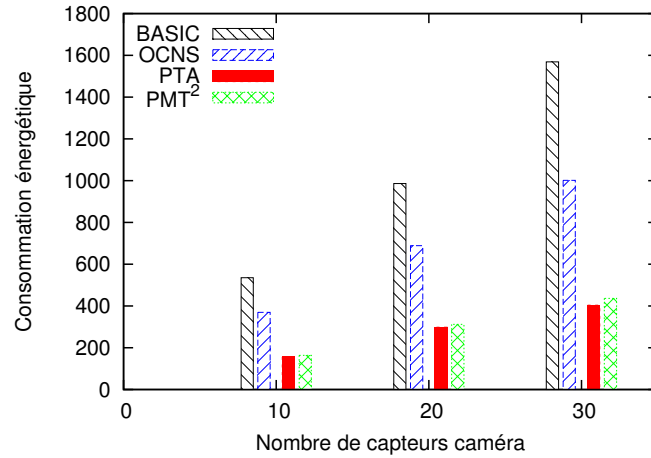


FIGURE 5.17 – Consommation d’énergie en fonction du nombre de capteurs caméra

5.4.2.2 Déviation moyenne

La figure 5.15 illustre la déviation moyenne entre la trajectoire réelle de la cible et celle obtenue par les solutions prédictives. Nous notons que PMT^2 obtient une déviation moyenne inférieure à celle obtenue par PTA, elle est en moyenne de 1.4 m pour 30 CCs, cela s’explique par l’efficacité du mécanisme combiné FKE+CuSum à prédire la future position de la cible et à détecter les changements de direction brusques. PTA se basant sur le FK dédié aux systèmes à évolution linéaire, n’est pas capable dans ce contexte d’accomplir sa tâche correctement.

La figure 5.16 illustre quant à elle un exemple de trajectoire réelle vs les trajectoires prédites par PMT^2 et PTA. Nous observons clairement que la trajectoire prédite par PMT^2 est la plus proche de la trajectoire réelle, ce qui confirme que PMT^2 est plus adapté au suivi de cible à trajectoires non-linéaires et aux changements fréquents et brusques, alors que PTA est plus approprié pour les trajectoires linéaires.

5.4.2.3 Consommation énergétique

La figure 5.17 représente la consommation énergétique moyenne du réseau durant une simulation (200 secondes) en fonction du nombre de capteurs caméras déployés. PMT^2 consomme 436.33 joules pour 30 CCs alors que pour le même nombre de capteurs OCNS consomme 1001.63 Joules. Cette différence est expliquée d’une part par l’efficacité du modèle prédictif utilisé dans PMT^2 où seuls les capteurs se trouvant sur la trajectoire de la cible sont activés. D’autre part, dans OCNS le processus de sélection implique des échanges de messages entre les capteurs au coût énergétique non-négligeable. Une raison supplémentaire est liée au nombre de CCs impliqués dans la localisation : là où PMT^2 utilise les données d’un seul CC, dans OCNS tous les CCs ayant une probabilité au dessus du seuil participent au processus de localisation. Les résultats de PTA sont expliqués par le nombre limité de CCs activés en raison des erreurs dans la prédiction. La solution BASIC consomme jusqu’à 1568.77 joules en raison de l’état d’activité permanent des caméras.

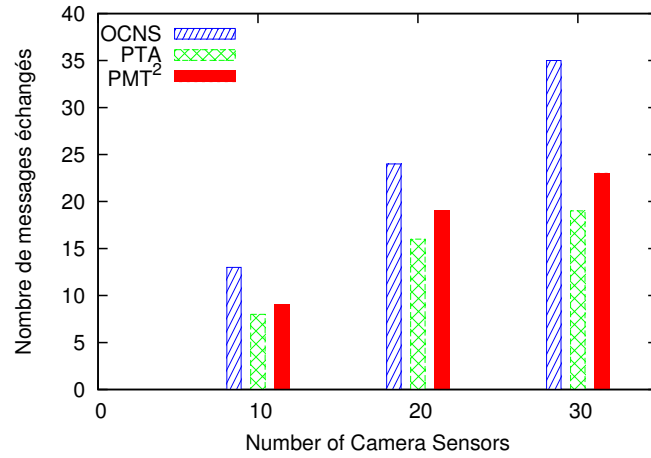


FIGURE 5.18 – Nombre de messages échangés en fonction du nombre de capteurs caméra

5.4.2.4 Nombre de messages échangés

Cette métrique représente le coût de communication des différentes solutions. La figure 5.18 illustre les résultats obtenus. PMT^2 et PTA ont le même principe de collaboration entre les nœuds ce qui explique leurs proches résultats. PMT^2 ayant une meilleure précision que PTA, cela engendre un coût de communication plus important. OCNS, obtient un nombre de messages échangés plus important, ce qui s'explique par le nombre de messages collaboratifs échangés durant la phase de sélection ou plusieurs CCs sont impliqués.

5.4.3 Discussion

Dans cette section, nous allons discuter les résultats obtenus aussi bien pour PTA que pour PMT^2 . D'abord nous notons que l'impact positif de la stratégie de déploiement a encore été démontré dans ces simulations. En effet, un bon placement permet d'améliorer sensiblement la précision du suivi. Nous pourrions donc naturellement s'attendre à ce que la solution BASIC avec des capteurs déployés en utilisant W-VFA présente de meilleures performances en terme de précision que n'importe quel autre schéma proposé, elle resterait néanmoins très couteuse en terme d'énergie.

Il est important de choisir sa stratégie de prédiction en fonction du contexte et plus précisément du modèle de mobilité de la cible. Comme on a pu l'observer, PTA présentait de bons résultats lorsqu'il s'agissait de cible à trajectoire linéaire. Ces performances se sont dégradées une fois le contexte changé. PMT^2 est efficace dans les deux cas, mais engendrerait un surcoût en traitement inutile pour des systèmes linaires. Il est somme toute important de noter que même si les algorithmes proactifs présentent de bonnes performances, ils restent inadaptés à certaines applications, en effet une erreur dans la prédiction peut engendrer la perte de la cible. Ceci est intolérable dans des applications critiques (surveillances militaires ou d'infrastructures critiques).

5.5 Conclusion

La présence de la cible dans un environnement donné est un événement localisé en raison de la perceptibilité restreinte et de la portée de capture limitée des nœuds. De plus, en raison des limitations énergétiques de ces derniers, nous ne pouvons pas les laisser actifs en permanence, la détection de la cible devient donc un challenge.

Tout au long de ce chapitre, nous nous sommes attelés à présenter le suivi de cible **non-communicante** dans un réseau de capteurs multimédia sans fil homogène. Parmi les questions auxquelles nous avons tenté de répondre : *comment détecter la présence de ce type de cible dans un tel environnement ? et une fois détectée, comment la localiser et relayer le suivi de nœud en nœud ?*

Nous avons inclus une phase de réveil implémentant comme son nom l'indique une stratégie de réveil périodique des capteurs. Nous avons ensuite proposé l'utilisation de modèles prédictifs pour relayer les informations de suivi de capteur en capteur. Ce genre de stratégie de suivi nécessite une connaissance de l'environnement à surveiller mais aussi une connaissance sur le type de cibles et leurs comportements afin de choisir le plus adapté à la situation.

Nous avons proposé deux stratégies de suivi à cinq (05) étapes : réveil, détection, localisation, prédiction et sélection du capteur successeur. PTA est destiné aux cibles évoluant de façon linéaire alors que PMT^2 quant à lui peut gérer des cibles évoluant de façon plus réalistes.

L'étude de performance a démontré l'efficacité des modèles proposés. PTA montre de bons résultats pour le suivi de cible à évolution linéaire mais obtient de moins bon dans d'autres cas. PMT^2 arrive à gérer des trajectoires non-linéaires, ce qui démontre l'efficacité du mécanisme prédictif combiné FKE+CuSum.

Pour conclure, nous noterons qu'il faut choisir la solution la plus adaptée au contexte et aux types d'applications visées pour obtenir les meilleures performances.

Chapitre 6

Conclusion générale

LES travaux menés dans cette thèse s'articulent autour d'une étude transversale qui a pour but la conception de solutions pour le suivi de cible mobile avec les réseaux de capteurs sans fil. L'efficacité et le succès de ces solutions dépend des efforts mis en œuvre pour permettre à la fois un suivi fiable et précis, tout en garantissant une consommation des ressources modérée et équitable des capteurs formant le réseau.

Le suivi de cible pour les réseaux de capteur est une application multi-étapes incluant la détection, la localisation de la cible et le relai d'informations entre les capteurs. Les caractéristiques propres à ce type de réseau empêchent l'utilisation directe des solutions de suivi implémentées dans les systèmes de surveillances classiques. Jusque là les concepteurs des solutions de suivi pour ce type de réseau ont d'avantage privilégié la partie localisation au détriment des autres. Dans ce travail, nous avons proposé des solutions plus complètes incluant parfois des étapes supplémentaires.

Nous nous sommes attachés à passer en revue les problématiques touchant au suivi de cible dans les réseaux de capteurs et à proposer des solutions fonctionnelles et propres à des contextes distincts dépendant aussi bien du type de cible que du type de réseau déployé. L'économie de ressource et plus particulièrement l'économie d'énergie étant la préoccupation principale, deux approches sont utilisées pour réduire la consommation des capteurs. La première vise à réduire le nombre de capteurs en état actif alors que la seconde vise à réduire la durée d'activation de ces capteurs en limitant les traitements au niveau local.

Le premier point qui nous a paru fondamental à aborder est le déploiement des capteurs dans la zone d'intérêt. Cela nous sert de base afin d'implémenter nos solutions dans un environnement adéquat. Le deuxième point consiste à tirer profit des cibles communicantes pour proposer un algorithme de suivi simple et efficace implémenté sur un réseau de capteur sans fil organisé en cluster. Nous nous sommes ensuite intéressés aux cibles non-communicantes, plus contraignantes à suivre. Nous avons proposé le déploiement d'un réseau hétérogène et exploité ces caractéristiques pour mener à bien le suivi.

La dernière réflexion que nous avons menée s'oriente quant à elle sur la prédiction du mouvement de la cible à suivre dans un environnement composé uniquement de capteurs multimédia sans fil. En fonction du modèle de mobilité de la cible, nous avons utilisé une version du Filtre du Kalman [65]. Ce mécanisme implémente un processus

à deux phases et prédit l'état d'un système en se basant sur son état antérieur. Cette dernière étude nous a permis d'une part de noter l'importance des mécanismes de réveil des capteurs dans un tel environnement homogène et d'autre part de comprendre l'intérêt du modèle de mobilité de la cible et son impact sur la prédiction de l'évolution de celle-ci.

Les algorithmes présentés permettent en moyenne d'améliorer de 41.66% la précision et de réduire de 38.98% la consommation énergétique. *PMT*² est la solution qui apporte les meilleurs résultats avec 95% de précision pour 30 capteurs déployés et 43.56% de consommation énergétique en moins.

6.1 Bilan

Les études menées durant cette thèse nous ont permis de répondre à certaines questions et de déduire les points suivants :

- Le suivi de cible dans les réseaux de capteurs sans fil est à la croisée de plusieurs domaines de recherches transverses : les mécanismes réseau pour la partie communication et collaboration entre les capteurs, le traitement du signal pour la partie localisation, et le traitement d'image pour la partie identification ou même la localisation ;
- Le déploiement des capteurs impacte fortement sur les performances des applications implémentées, le choix de la stratégie de déploiement utilisée doit donc être en fonction des objectifs à atteindre et des contraintes spécifiques des capteurs déployés (portée de transmission, portée de capture, etc) ;
- le choix de la solution de suivi, de même que pour la stratégie de déploiement, doit aussi être en fonction du contexte en tenant compte de paramètres parmi lesquels le type de cible (communicante ou non-communicante), le type de capteurs déployés ou encore le modèle de mobilité de la cible ;
- la connaissance de l'environnement et du type de cible facilitent grandement le processus de suivi,
- les réseaux de capteurs multimédia sans fil se prêtent plus aux applications de suivi. En effet, les informations capturées par les caméras sont plus précises et plus facilement interprétables.

6.2 Perspectives

Les travaux que nous avons menés offrent de notre point de vue de nombreuses perspectives intéressantes. En premier lieu, tester la faisabilité des solutions proposées sur des réseaux de capteurs semble être une étape évidente. En effet, les études menées n'ont pour l'instant été validées que par simulations. Le comportement des algorithmes sur des plateformes réelles serait donc un facteur décisif pour l'évolution de ces derniers.

Une deuxième perspective consisterait à traiter les problèmes de délai qui pourrait se poser pour ce type d'application. Par délai nous nous entendons le délai de traitement et de relai d'informations. Ce délai dépend des caractéristiques matérielles des capteurs (vitesse de calcul, envoi/réception de message) et est lié à la vitesse de déplacement de la cible. Plus cette vitesse est importante plus ce délai doit être réduit. La question

qui se poserait donc et à laquelle nous devrions répondre est la suivante : *en fonction des caractéristiques matérielles dont nous disposons jusqu'à quelle vitesse maximale pouvons nous suivre une cible ?*

Les solutions proposées sont toutes basées sur la collaboration entre les capteurs. La perte de paquets devient donc critique pour le bon déroulement du processus de suivi, particulièrement pour les réseaux à grande échelle où les collisions et la perte de paquets sont plus fréquentes. Dans un effort d'amélioration et d'évolutivité de nos solutions, une étude est donc à envisager sur l'aspect acheminement et transport de données.

Enfin, le suivi multi-cibles est une extension naturelle des solutions proposées. En effet, dans ce travail, nous traitons le suivi mono-cible. Le suivi multi-cibles est complexe et implique des étapes supplémentaires, entre autre l'identification afin de permettre de différencier les cibles et de les dénombrer. Des mécanismes de fusion de données sont aussi à prévoir.

Liste des travaux et articles

Revue internationale

I. Boulanouar, S. Lohier, A. Rachedi, et G. Roussel, "DTA : Deployment and Tracking Algorithm in Wireless Multimedia Sensor Networks", Ad Hoc & Sensor Wireless Networks (*to appear*) .

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

I. Boulanouar, S. Lohier, A. Rachedi, et G. Roussel, " PMT^2 : A Predictive Mobile Target Tracking Algorithm in Wireless Multimedia Sensor Networks", ISCC, 2014 (*accepted*)

I. Boulanouar, S. Lohier, A. Rachedi, et G. Roussel, "A Collaborative Tracking Algorithm for Communicating Target in Wireless Multimedia Sensor Networks", WMNC, 2014 (*accepted*)

I. Boulanouar, S. Lohier, A. Rachedi, et G. Roussel, "PTA : A Predictive Tracking Algorithm in Wireless Multimedia Sensor Networks", GIIS, Trento, Italy 2013.

I. Boulanouar, S. Lohier, A. Rachedi, et G. Roussel, "CTA : a Collaborative Tracking algorithm in Wireless Sensor Networks", ICNC, San Diego, CA, USA, 2013.

I. Boulanouar, A. Rachedi, S. Lohier, et G. Roussel, "EAOT : Energy-Aware Object Tracking using Heterogeneous", Wireless days, Niagara Falls, Canada 2011.

Posters

I. Boulanouar, S. Lohier, A. Rachedi, et G. Roussel, "Target Tracking Algorithms in Wireless Multimedia sensor Network", INFOCOM, STUDENT POSTER SESSION, Avril 2013.

I. Boulanouar, S. Lohier, A. Rachedi, et G. Roussel, " Collaborative Tracking Algorithm using Heterogeneous Wireless Sensor Networks ", Forum DIGITEO (Poster), 2012.

I. Boulanouar, A. Rachedi, S. Lohier, et G. Roussel, "Energy-Aware Object Tracking Algorithm using Heterogeneous Wireless Sensor Networks", Forum DIGITEO (Poster), Novembre 2011.

I. Boulanouar, A. Rachedi, S. Lohier, et G. Roussel, "Energy-Aware Object Tracking Algorithm using Heterogeneous Wireless Sensor Networks" , École d'été RESCOM , Juin 2011.

Table des figures

2.1	Composants physiques d'un capteur sans fil.	18
2.2	Domaines d'application des réseaux de capteurs sans fil.	19
2.3	Panel de capteurs.	22
2.4	Classification des algorithmes de suivi dans la littérature.	26
3.1	Trilatération.	37
3.2	Imote2 [2] et le champ de vision d'un capteur caméra.	39
3.3	Architecture réseau en cluster.	40
3.4	Exemple illustratif de déploiement avant/après W-VFA.	41
3.5	Mécanisme d'association.	42
3.6	Échange de messages durant les phases de détection et de localisation	44
3.7	Cible détectée par plus d'un cluster	45
3.8	Zone d'intérêt	49
3.9	Taux de couverture réseau en fonction du capteurs caméra.	50
3.10	Taux de couverture vidéo (Taille de la zone : 200m x 200m)	50
3.11	Taux de couverture vidéo (Taille de la zone : 100m x 100m)	50
3.12	Précision du suivi en fonction du nombre de capteurs caméras.	52
3.13	Trajectoire réelle vs trajectoire obtenue par CTC.	52
3.14	Consommation d'énergie en fonction du nombre de capteurs caméras.	53
3.15	Nombre de messages échangés en fonction du nombre de capteurs caméras.	53
4.1	Imote2	58
4.2	Exemple illustratif du découpage de sous-zone critique.	59
4.3	Exemple illustratif de la stratégie de déploiement	60
4.4	Exemple illustratif de l'angle de déviation θ	61
4.5	<i>Background subtraction</i> [10].	62
4.6	Exemple illustratif du fonctionnement de CTA.	63
4.7	Organigramme représentant les traitements au niveau du CM.	65
4.8	Organigramme traitements CC pour CTA-déterministe	66
4.9	Organigramme traitements CC pour CTA-probabiliste	66
4.10	Précision du suivi en fonction du nombre de sous-zones critiques	69
4.11	Déviation moyenne en fonction du nombre de sous-zones critiques	69
4.12	Trajectoire réelle vs trajectoire CTA	70
4.13	Consommation d'énergie en fonction du nombre de sous-zones critiques.	71
4.14	Nombre de messages échangés	72

5.1	Mouvement linéaire d'un objet mobile	76
5.2	Processus récursif du Filtre de Kalman	77
5.3	Réseaux de capteurs sans fil multimédia homogène	79
5.4	Les cinq étapes de PTA	80
5.5	Localisation	81
5.6	Les étapes de PMT^2	83
5.7	Exemple illustratif d'un diagramme de Voronoi	84
5.8	Précision du suivi en fonction du nombre de capteurs caméra	88
5.9	Déviations moyennes en fonction du nombre de capteurs caméra	89
5.10	Trajectoire réelles vs trajectoire prédite par PTA et PAM	89
5.11	Consommation d'énergie en fonction du nombre de capteurs caméra	90
5.12	Nombre de messages échangés en fonction du nombre de capteurs caméra	90
5.13	Terrain de simulation	91
5.14	Précision du suivi en fonction du nombre de capteurs caméra	92
5.15	Déviations moyennes en fonction du nombre de capteurs caméra	92
5.16	Trajectoire réelle vs trajectoire prédite par PMT^2 et PTA	92
5.17	Consommation d'énergie en fonction du nombre de capteurs caméra	93
5.18	Nombre de messages échangés en fonction du nombre de capteurs caméra	94

Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques matérielles d'un panel de capteurs sans fil existants.	23
2.2	Comparaison des solutions de suivi	29
3.1	Paramètres de simulation	49
3.2	Paramètres du modèle énergétique (Imote2) [2] [4]	49
4.1	Paramètres de simulation	67
4.2	Résultats stratégie de déploiement	68
4.3	Nombre de capteurs déployés	68
4.4	Paramètres consommation énergétique	71
5.1	Paramètres de simulation	87
5.2	Paramètres du modèle énergétique (Imote2) [2] [4]	87

Bibliographie

- [1] Background subtraction. <http://www.idiap.ch/~odobez/human-detection/>.
- [2] Imote2. <http://www.memsic.com>.
- [3] Ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [4] D. Jung A. Barton-Sweeney and A. Savvides. imote2 node and enalab camera module power measurements. In *In ENALAB Technical Report : 090601*, 2006.
- [5] Ian F Akyildiz, Tommaso Melodia, and Kaushik R Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer networks*, 51(4) :921–960, 2007.
- [6] Ian F Akyildiz, Tommaso Melodia, and Kaushik R Chowdhury. Wireless multimedia sensor networks : Applications and testbeds. *Proceedings of the IEEE*, 96(10) :1588–1605, 2008.
- [7] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. A survey on sensor networks. *Communications magazine, IEEE*, 40(8) :102–114, 2002.
- [8] M Amac Guvensan and A Gokhan Yavuz. On coverage issues in directional sensor networks : A survey. *Ad Hoc Networks*, 9(7) :1238–1255, 2011.
- [9] Anish Arora, Prabal Dutta, Sandip Bapat, Vinod Kulathumani, Hongwei Zhang, Vinayak Naik, Vineet Mittal, Hui Cao, Murat Demirbas, Mohamed Gouda, et al. A line in the sand : a wireless sensor network for target detection, classification, and tracking. *Computer Networks*, 46(5) :605–634, 2004.
- [10] Yannick Benezeth, P-M Jodoin, Bruno Emile, Hélène Laurent, and Christophe Rosenberger. Review and evaluation of commonly-implemented background subtraction algorithms. In *Pattern Recognition, 2008. ICPR 2008. 19th International Conference on*, pages 1–4. IEEE, 2008.
- [11] Sania Bhatti and Jie Xu. Survey of target tracking protocols using wireless sensor network. In *Wireless and Mobile Communications, 2009. ICWMC'09. Fifth International Conference on*, pages 110–115. IEEE, 2009.
- [12] Tracy Camp, Jeff Boleng, and Vanessa Davies. A survey of mobility models for ad hoc network research. *Wireless communications and mobile computing*, 2(5) :483–502, 2002.
- [13] Jason Campbell, Phillip B Gibbons, Suman Nath, Padmanabhan Pillai, Srinivasan Seshan, and Rahul Sukthankar. Irisnet : an internet-scale architecture for multimedia sensors. In *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Multimedia*, pages 81–88. ACM, 2005.

- [14] Mihaela Cardei, My T Thai, Yingshu Li, and Weili Wu. Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 3, pages 1976–1984. IEEE, 2005.
- [15] Wang-Rong Chang, Hui-Tang Lin, and Zong-Zhi Cheng. Coda : a continuous object detection and tracking algorithm for wireless ad hoc sensor networks. In *Consumer Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE*, pages 168–174. IEEE, 2008.
- [16] Honglong Chen. A hybrid cluster-based target tracking protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 2013.
- [17] LAN/MAN Standards Committee et al. Part 15.4 : wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). *IEEE Computer Society*, 2003.
- [18] Fatemeh Deldar and Mohammad Hossien Yaghmaee. Energy efficient prediction-based clustering algorithm for target tracking in wireless sensor networks. In *International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (IN-COS)*, Thessaloniki, Greece, 2010.
- [19] Sarang Deshpande and Krishna M Sivalingam. A study of energy vs. quality of tracking trade-off in wireless sensor networks. In *International Conference on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS)*, Bengaluru (Bangalore), India, 2011.
- [20] Santpal S Dhillon and Piet Van Mieghem. Comparison of random walk strategies for ad hoc networks. In *The Sixth Annual Mediterranean Ad Hoc Networking WorkShop, Corfu, Greece*, 2007.
- [21] David M Doolin and Nicholas Sitar. Wireless sensors for wildfire monitoring. In *Smart Structures and Materials*, pages 477–484. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [22] Ian T Downard. Simulating sensor networks in ns-2. Technical report, DTIC Document, 2004.
- [23] Samuel Fernández, David Gualda, Juan Carlos García, Juan Jesús García, Jesús Ureña, and Raquel Gutiérrez. Indoor location system based on zigbee devices and metric description graphs. In *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP)*, Floriana, Malta, 2011.
- [24] Michael Fitzgerald. Technnology review : Tracking a shopper’s habits. *Technology Review.[En ligne]*, 4, 2008.
- [25] TB Gosnell, JM Hall, CL Jam, DA Knapp, ZM Koenig, SJ Luke, BA Pohl, A Schach von Wittenau, and JK Wolford. Gamma-ray identification of nuclear weapon materials. Technical report, Lawrence Livermore National Lab., Livermore, CA (US), 1997.
- [26] F. Gustafsson. *Adaptive filtering and change detection*, volume 1. Wiley New York, 2000.
- [27] Tian He, Chengdu Huang, Brian M Blum, John A Stankovic, and Tarek F Abdelzaher. Range-free localization and its impact on large scale sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 4(4) :877–906, 2005.

- [28] Wendi Rabiner Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, USA, 2000.
- [29] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and James Collins. GPS theory and practice. 1997.
- [30] Chi-Fu Huang and Yu-Chee Tseng. The coverage problem in a wireless sensor network. *Mobile Networks and Applications*, 10(4) :519–528, 2005.
- [31] Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) IEEE Std. 802.11-2007 and IEEE Std. 802.11 Physical Layer (PHY) specifications. Institute of electrical and engineers, inc. Technical report, 2007.
- [32] Amit Jardosh, Elizabeth M Belding-Royer, Kevin C Almeroth, and Subhash Suri. Towards realistic mobility models for mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 217–229. ACM, 2003.
- [33] Bo Jiang, Binoy Ravindran, and Hyeonjoong Cho. Probability-based prediction and sleep scheduling for energy-efficient target tracking in sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 12(4) :735–747, 2013.
- [34] P Johnson and DC Andrews. Remote continuous physiological monitoring in the home. *Journal of telemedicine and telecare*, 2(2) :107–113, 1996.
- [35] Simon J Julier and Jeffrey K Uhlmann. A new extension of the kalman filter to nonlinear systems. In *Int. symp. aerospace/defense sensing, simul. and controls*, volume 3, pages 3–2. Orlando, FL, 1997.
- [36] Hyunuk Kim and Ha Yoon Song. Formulating human mobility model in a form of continuous time markov chain. *Procedia Computer Science*, 10 :389–396, 2012.
- [37] Shinji Kita, Kazumasa Murai, and Hitoshi Ogatsu. Color image processing, June 3 1997. US Patent 5,636,290.
- [38] Purushottam Kulkarni, Deepak Ganesan, Prashant Shenoy, and Qifeng Lu. Senseye : a multi-tier camera sensor network. In *Proceedings of the 13th annual ACM international conference on Multimedia*, pages 229–238. ACM, 2005.
- [39] Hsiang-Tsung Kung and Dario Vlah. Efficient location tracking using sensor networks. In *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*, volume 3, pages 1954–1961. IEEE, 2003.
- [40] Chunseok Lee, Donghoon Shin, Sang Won Bae, and Sunghee Choi. Best and worst-case coverage problems for arbitrary paths in wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 11(6) :1699 – 1714, 2013.
- [41] Sung-Min Lee, Hojung Cha, and Rhan Ha. Energy-aware location error handling for object tracking applications in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 30(7) :1443 – 1450, 2007.
- [42] B. Liang and Z. Haas. Predictive distance-based mobility management for pcs networks. In *IEEE International Conference on Computer Communications, INFOCOM*, New York, USA, 1999.

- [43] Ben Liang and Zygmunt J. Haas. Predictive distance-based mobility management for multidimensional pcs networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 11(5) :718–732, October 2003.
- [44] Chih-Yu Lin, Wen-Chih Peng, and Yu-Chee Tseng. Efficient in-network moving object tracking in wireless sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 5(8) :1044–1056, 2006.
- [45] Stephanie Lindsey, Cauligi Raghavendra, and Krishna M. Sivalingam. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 13(9) :924–935, 2002.
- [46] Hui Liu, Houshang Darabi, Pat Banerjee, and Jing Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 37(6) :1067–1080, 2007.
- [47] Juan Liu, Maurice Chu, and James E Reich. Multitarget tracking in distributed sensor networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 24(3) :36–46, 2007.
- [48] Liang Liu, Xi Zhang, and Huadong Ma. Optimal node selection for target localization in wireless camera sensor networks. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 59(7) :3562–3576, 2010.
- [49] Andrew Logothetis, Vikram Krishnamurthy, and Jan Holst. A bayesian {EM} algorithm for optimal tracking of a maneuvering target in clutter. *Signal Processing*, 82(3) :473 – 490, 2002.
- [50] Zhenxing Luo and Thomas C Jannett. A multi-objective method to balance energy consumption and performance for energy-based target localization in wireless sensor networks. In *Southeastcon, 2012 Proceedings of IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [51] Huadong Ma, Xi Zhang, and Anlong Ming. A coverage-enhancing method for 3d directional sensor networks. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pages 2791–2795. IEEE, 2009.
- [52] Alan Mainwaring, David Culler, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, and John Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 88–97. ACM, 2002.
- [53] Majdi Mansouri, Lyes Khoukhi, Hazem Nounou, and Mohamed Nounou. Genetic algorithm optimization for quantized target tracking in wireless sensor networks. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2011.
- [54] Guoqiang Mao, Bariş Fidan, and Brian Anderson. Wireless sensor network localization techniques. *Computer networks*, 51(10) :2529–2553, 2007.
- [55] Tommaso Melodia, Dario Pompili, Vehbi C Gungor, and Ian F Akyildiz. A distributed coordination framework for wireless sensor and actor networks. In *Proceedings of the 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 99–110. ACM, 2005.
- [56] M Nandhini and V.R.Sarma Dhulipala. Energy-efficient target tracking algorithms in wireless sensor networks : An overview. *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, 3. <http://www.cs.cornell.edu/home/chew/Delaunay.html>.

- [57] Tomasz Naumowicz, Robin Freeman, Andreas Heil, Martin Calsyn, Eric Hellmich, Alexander Brändle, Tim Guilford, and Jochen Schiller. Autonomous monitoring of vulnerable habitats using a wireless sensor network. In *Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks*, pages 51–55. ACM, 2008.
- [58] Mohammed M Olama, Seddik M Djouadi, and Chris S Pendley. Position and velocity tracking in mobile cellular networks using the particle filter. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Las Vegas, USA, 2006.
- [59] Yahya Esmail Osais, Marc St-Hilaire, and R Yu Fei. Directional sensor placement with optimal sensing range, field of view and orientation. *Mobile Networks and Applications*, 15(2) :216–225, 2010.
- [60] H. Oztarak, K. Akkaya, and A. Yazici. Efficient localization and tracking of multiple objects in wireless multimedia sensor networks. *Ad Hoc and Wireless Sensor Networks*, 19, 2013.
- [61] Charles E Perkins and Elizabeth M Royer. Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *Mobile Computing Systems and Applications, 1999. Proceedings. WMCSA '99. Second IEEE Workshop on*, pages 90–100. IEEE, 1999.
- [62] Emile M Petriu, Nicolas D Georganas, Dorina C Petriu, Dimitrios Makrakis, and Voicu Z Groza. Sensor-based information appliances. *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, 3(4) :31–35, 2000.
- [63] Daniele Puccinelli and Martin Haenggi. Wireless sensor networks : applications and challenges of ubiquitous sensing. *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, 5(3) :19–31, 2005.
- [64] K Ramya, K Praveen Kumar, and V Srinivas Rao. A survey on target tracking techniques in wireless sensor networks. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*, 3(4), 2012.
- [65] Maria Isabel Ribeiro. Kalman and extended kalman filters : Concept, derivation and properties. *Institute for Systems and Robotics*, page 43, 2004.
- [66] Ana-Maria Roxin, Jaafar Gaber, Maxime Wack, Ahmed Nait Sidi Moh, et al. Survey of wireless geolocation techniques. In *IEEE Globecom Workshops*, 2007.
- [67] Prasan Kumar Sahoo, Jang-Zern Tsai, and Hong-Lin Ke. Vector method based coverage hole recovery in wireless sensor networks. In *Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2010 Second International Conference on*, pages 1–9. IEEE, 2010.
- [68] Samer Samarah, Muhannad Al-Hajri, and Azzedine Boukerche. A predictive energy-efficient technique to support object-tracking sensor networks. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 60(2) :656–663, 2011.
- [69] Jens Schulz, Frank Reichenbach, Jan Blumenthal, and Dirk Timmermann. Low cost system for detecting leakages along artificial dikes with wireless sensor networks. In *Proceedings of the workshop on Real-world wireless sensor networks*, pages 66–70. ACM, 2008.
- [70] Kuei-Ping Shih, Hung-Chang Chen, Chien-Min Chou, and Bo-Jun Liu. On target coverage in wireless heterogeneous sensor networks with multiple sensing units. *Journal of Network and Computer Applications*, 32(4) :866–877, 2009.

- [71] Neelofer Tamboli and Mohamed Younis. Coverage-aware connectivity restoration in mobile sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 33(4) :363–374, 2010.
- [72] Guang Tan, Stephen A Jarvis, and A-M Kermarrec. Connectivity-guaranteed and obstacle-adaptive deployment schemes for mobile sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 8(6) :836–848, 2009.
- [73] Nurcan Tezcan and Wenye Wang. Self-orienting wireless multimedia sensor networks for occlusion-free viewpoints. *Computer networks*, 52(13) :2558–2567, 2008.
- [74] Sam Phu Manh Tran and T Andrew Yang. Oco : Optimized communication & organization for target tracking in wireless sensor networks. In *Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2006. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 428–435. IEEE, 2006.
- [75] Jorge Urrutia et al. Art gallery and illumination problems. *Handbook of computational geometry*, pages 973–1027, 2000.
- [76] S Vasuhi, A Annis Fathima, S Anand Shanmugam, and Vijay Vaidehi. Object detection and tracking in secured area with wireless and multimedia sensor network. In *Networked Digital Technologies*, pages 356–367. Springer, 2012.
- [77] Markus Wälchli, Piotr Skoczylas, Michael Meer, and Torsten Braun. Distributed event localization and tracking with wireless sensors. In *Wired/Wireless Internet Communications*, pages 247–258. Springer, 2007.
- [78] Xiaorui Wang, Guoliang Xing, Yuanfang Zhang, Chenyang Lu, Robert Pless, and Christopher Gill. Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 28–39. ACM, 2003.
- [79] Yun Wang, Xiaodong Wang, Demin Wang, and Dharma P Agrawal. Range-free localization using expected hop progress in wireless sensor networks. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 20(10) :1540–1552, 2009.
- [80] Zhibo Wang, Hongbin Li, Xingfa Shen, Xice Sun, and Zhi Wang. Tracking and predicting moving targets in hierarchical sensor networks. In *Networking, Sensing and Control, 2008. ICNSC 2008. IEEE International Conference on*, pages 1169–1173. IEEE, 2008.
- [81] Zijian Wang, Eyuphan Bulut, and Boleslaw K Szymanski. Distributed energy-efficient target tracking with binary sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 6(4) :32, 2010.
- [82] Greg Welch and Gary Bishop. An introduction to the kalman filter, 1995.
- [83] Jianhong Cecilia Xia, Panlop Zeepongsekul, and Colin Arrowsmith. Modelling spatio-temporal movement of tourists using finite markov chains. *Mathematics and Computers in Simulation*, 79(5) :1544–1553, 2009.
- [84] Enyang Xu, Zhi Ding, and Soura Dasgupta. Target tracking and mobile sensor navigation in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, 12(1) :177 – 186, 2013.

- [85] Yingqi Xu, Julian Winter, and Wang-Chien Lee. Dual prediction-based reporting for object tracking sensor networks. In *Mobile and Ubiquitous Systems : Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004. The First Annual International Conference on*, pages 154–163. IEEE, 2004.
- [86] Yingqi Xu, Julian Winter, and Wang-Chien Lee. Prediction-based strategies for energy saving in object tracking sensor networks. In *Mobile Data Management, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Conference on*, pages 346–357. IEEE, 2004.
- [87] Mark Yarvis, Nandakishore Kushalnagar, Harkirat Singh, Anand Rangarajan, York Liu, and Suresh Singh. Exploiting heterogeneity in sensor networks. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 2, pages 878–890. IEEE, 2005.
- [88] Mohamed Younis and Kemal Akkaya. Strategies and techniques for node placement in wireless sensor networks : A survey. *Ad Hoc Networks*, 6(4) :621–655, 2008.
- [89] Zainab R Zaidi and Brian L Mark. Real-time mobility tracking algorithms for cellular networks based on kalman filtering. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 4(2) :195–208, 2005.
- [90] Z.R. Zaidi and B.L. Mark. Mobility tracking based on autoregressive models. in *IEEE Transactions on mobile Computing*, 10, 2011.
- [91] Wensheng Zhang and Guohong Cao. Dctc : dynamic convoy tree-based collaboration for target tracking in sensor networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 3(5) :1689–1701, 2004.
- [92] . Y.G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang. Peas : A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. In *IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, ICDCS*, Providence, USA, 2003.
- [93] Chuan Zhu, Chunlin Zheng, Lei Shu, and Guangjie Han. A survey on coverage and connectivity issues in wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 35(2) :619 – 632, 2012.
- [94] Yi Zou and Krishnendu Chakrabarty. Sensor deployment and target localization based on virtual forces. In *INFOCOM*, San Francisco, USA, 2003.
- [95] Yi Zou and Krishnendu Chakrabarty. Sensor deployment and target localization in distributed sensor networks. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, 3(1) :61–91, 2004.

